



**Arikson Jorge Martins Tavares**

Licenciado em Engenharia Mecânica

## **Modelação Numérica do Carregamento de uma Estrutura Confinada sujeita a uma Onda de Choque Explosiva**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Francisco Figueiredo e Silva da Cunha  
Salvado, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Co-orientador: João Mário Burguete Botelho Cardoso,  
Professor Associado, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Paulo Vale Urgueira

Arguente: Prof. Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil



**Modelação numérica do carregamento de uma estrutura confinada sujeita a uma onda de choque explosiva**

Copyright © Arikson Jorge Martins Tavares, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

É com imensa estima que expresso aqui o mais profundo agradecimento a aqueles que me apoiaram e me incentivaram e que de forma direta ou indireta tornaram a realização deste trabalho uma realidade.

Ao meu Orientador, Professor Francisco Figueiredo e Silva da Cunha Salvado, pelo conhecimento transmitido, total disponibilidade, pelo acompanhamento e pelo esclarecimento das diversas dúvidas que foram surgindo durante a realização deste trabalho.

Ao Professor João Mário Burguete Botelho Cardoso, pela sua co-orientação, pela total disponibilidade e pelo apoio que me proporcionou ao longo da realização deste trabalho.

Ao meu amigo Patrick Azevedo da Graça, um dos que mais me ajudou neste percurso e por ser um dos responsáveis pela minha vinda à esta Faculdade. Também um especial agradecimento ao Pedro Henriques, pela amizade, pelo apoio e incentivos. Aos restantes colegas e amigos que me acompanharam durante todo este percurso, um muito obrigado!

À minha família, em especial aos meus Pais e aos meus irmãos, um enorme obrigada pelo apoio incondicional, incentivo, amizade, por todos os ensinamentos de vida e total ajuda na conclusão desta etapa. A eles, dedico este trabalho!



# Resumo

A ocorrência de explosões em indústrias e em infraestruturas civis quer acidentais quer devido a ataques terroristas, vêm colocando à engenharia cada vez maiores desafios relativos à concepção de soluções que aumentem a proteção dessas infraestruturas contra os efeitos das explosões.

Neste trabalho, utilizou-se um hidrocódigo comercial, o LS-DYNA, no tratamento e simulação de problemas envolvendo ondas de choque explosivas tendo-se realizado um estudo paramétrico do efeito da detonação de um alto explosivo no interior de um compartimento fechado, de geometria prismática retangular, em que as dimensões foram sendo variadas.

Foi necessário calibrar previamente o modelo geométrico escolhido bem como os parâmetros utilizados para gerar a onda de choque explosiva, de forma a assegurar a consistência dos resultados, dado que não foi possível a realização de ensaios experimentais. Foi utilizada uma malha multimaterial Arbitrária Lagrangiana-Euleriana (MMALE), com recurso a elementos sólidos com um único ponto de integração, recorrendo ao método das diferenças finitas centrais para as integrações em relação ao tempo, tendo-se utilizado como base de calibração a literatura consultada.

Os dados obtidos no estudo paramétrico foram tratados recorrendo a métodos estatísticos de regressão de forma a se obter uma relação fenomenológica para prever as pressões máximas dentro de um compartimento.

**Palavras-chave:** Simulação Numérica de Explosões; Altos explosivos; Explosões em Espaços Confinados; formulação Multi-Material ALE;





# Abstract

The occurrence of explosions in industries or in civilian infrastructures either accidental or due to terrorist attacks have greatly heightened the engineering challenges related to the design of solutions to increase the protection of these infrastructures against the effects of explosions.

In this work, a commercially available hydrocode, the LS-DYNA was used in the analysis and simulation of problems involving explosive blast waves and a parametric study was performed to investigate the effect of a high explosive detonation in a confined chamber of rectangular prismatic geometry which dimensions were made to vary.

The geometric model and the parameters used to generate the explosive blast wave were firstly calibrated against data of the consulted literature, in order to ensure the consistency of the results. An Arbitrary Lagrangian-Eulerian multi-material (MMALE) mesh with solid elements of one integration point was used. The central finite difference method was used to integrate the position of the mesh in time.

The results from the parametric study were analyzed using statistical regression methods in order to obtain a phenomenological relation to predict the maximum pressure within the closed chamber.

**Key Words:** Numerical Simulation of Blast Wave; High Explosive; Confined Blast Wave; ALE Multi-Material formulation;



# Índice de matérias

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract .....	v
Índice de matérias .....	vii
Índice de figuras .....	xi
Índice de tabelas .....	xv
Capítulo 1    Introdução.....	1
1.1    Motivação e Objetivos .....	1
1.2    Estrutura da tese .....	3
Capítulo 2    Estado da arte .....	5
2.1    Explosão.....	5
2.1.1    Explosão química .....	5
2.2    Explosivos .....	6
2.2.1    Explosivos primários.....	6
2.2.2    Explosivos secundários .....	7
2.2.3    Propelentes .....	7
2.3    O processo da detonação .....	7
2.3.1    Modelo de ZND .....	7
2.3.2    Modelo CJ .....	9
2.3.3    Perfil de uma onda de detonação.....	13
2.4    Fenómeno das ondas de choque no ar .....	14
2.5    A lei de escala de Hopkinson e Cranz.....	16
2.6    TNT equivalente.....	18
2.7    Classificação de carregamentos explosivos .....	18
2.7.1    Explosões não confinadas .....	19
2.7.2    Explosões confinadas .....	21
2.8    Explosão num espaço confinado .....	23
2.9    Reflexão de uma onda de explosão numa superfície.....	23
Capítulo 3    Simulação numérica .....	25
3.1    Descrição do LS-DYNA .....	25
3.1.1    Método das diferenças finitas centrais para integração temporal explícita .....	26
3.1.2    Método explícito e método implícito .....	27

3.1.3	Método Lagrangiano .....	31
3.1.4	Método Euleriano .....	32
3.1.5	Método ALE.....	32
3.1.6	Métodos de advecção .....	39
Capítulo 4	Simulação numérica no LS-DYNA.....	43
4.1	Ferramentas computacionais utilizadas nesta tese .....	43
4.2	INITIAL_VOLUME_FACTION_GEOMETRY .....	44
4.3	Modelos constitutivos e equações de estado .....	44
4.3.1	Equações de estado (EOS) e modelo constitutivo do explosivo .....	44
4.3.2	Equação de estado e modelo constitutivo do ar.....	46
4.4	<i>Mapping</i> 2D para 3D.....	47
4.5	Interação fluido-sólido (FSI) .....	48
4.6	Viscosidade artificial.....	51
4.7	Condições de fronteiras .....	53
4.8	Elementos com um ponto de integração.....	54
Capítulo 5	Calibração da metodologia ALE e do modelo numérico .....	57
5.1	Calibração do método ALE.....	57
5.1.1	Simulação da explosão do alto-explosivo C-4 ao ar livre .....	57
5.2	Calibração do modelo numérico.....	66
5.2.1	Simulação da explosão do alto-explosivo TNT numa caixa fechada.....	66
Capítulo 6	Estudo paramétrico.....	83
6.1	Características de um carregamento confinado dentro de um compartimento fechado 83	
6.1.1	Modelação numérica .....	84
6.1.2	Apresentação e análise dos resultados.....	89
6.2	Determinação da relação fenomenológica .....	103
6.3	Apresentação e análise dos resultados.....	103
Capítulo 7	Conclusões .....	109
7.1	Conclusões .....	109
7.2	Trabalho futuro.....	110
Referências	.....	111
ANEXOS.....		116
ANEXO-A.....		116
ANEXO-B.....		117

ANEXO-C.....	127
ANEXO-D.....	130
ANEXO-E.....	133
ANEXO-F.....	136
ANEXO-G.....	139
ANEXO-H.....	141
ANEXO-I.....	144



# Índice de figuras

1.1	Figura 2.1 – Classificação dos explosivos de acordo com a sua performance e sensibilidade [12].	6
2.1	Figura 2.2 – Modelo físico de uma onda de detonação [12].	8
3.1	Figura 2.3 – Modelo da onda de detonação de Chapman-Jouguet [17].	9
4.1	Figura 2.4 – Onda de choque propagando num volume de controlo [16].	10
5.1	Figura 2.5 – Representação da detonação no plano P- $\nu$ [16].	13
6.1	Figura 2.6 – Curva pressão-distância de uma onda de detonação [12].	14
7.1	Figura 2.7 – Detonação de 500 ton de um alto-explosivo no ar [20].	14
8.1	Figura 2.8 – Variação da pressão em função da distância da explosão [3].	15
9.1	Figura 2.9 – Representação esquemática do perfil da curva de pressão de uma onda de choque em função do tempo (curva de Friedlander) [6].	15
10.1	Figura 2.10 – Propriedades de uma onda de choque relacionadas com o fator de escala para uma carga explosiva esférica [19].	17
11.1	Figura 2.11 – Representação esquemática da <i>free air burst</i> [24].	19
12.1	Figura 2.12 – Representação esquemática da <i>air burst</i> [24].	20
13.1	Figura 2.13 – Representação esquemática da <i>surface burst</i> [24].	20
14.1	Figura 2.14 – Representação esquemática de uma explosão <i>fully vented</i> [24].	21
15.1	Figura 2.15 – Representação esquemática de uma explosão <i>partially vented</i> [24].	22
16.1	Figura 2.16 – Representação esquemática de uma explosão <i>fully confined</i> [24].	22
17.1	Figura 2.17 – Reflexão de uma onda de choque na superfície do solo para uma explosão ocorrendo a uma distância acima do solo [3].	23
18.1	Figura 2.18 – Variação da pressão incidente da pressão refletida com o tempo, numa posição fixa [3].	24
19.1	Figura 3.1 – Representação da formulação Lagrangiana [35].	31
20.1	Figura 3.2 – Malha largamente deformada devido ao impacto de um projétil [12].	31
21.1	Figura 3.3 – Representação da formulação Euleriano [35].	32
22.1	Figura 3.4 – Representação da formulação ALE [35].	33
23.1	Figura 3.5 – Representação dos mapeamentos entre os domínios de material, espacial e de referência [34].	34
24.1	Figura 3.6 – Fase Lagrangiano e fase de remapeamento no método do operador split [34].	36

25.1	Figura 3.7 – Diferença entre o método Euleriano e o método ALE: a) método Euleriano b) método ALE [26]. ....	38
26.1	Figura 3.8 – A variação linear da variável $\phi_L$ é descrita pela linha vermelha e a linha tracejada define o declive de $\phi_L$ sobre um elemento utilizando o método de diferenças centrais. O círculo indica que um novo valor máximo é introduzido na posição do círculo [39]. ....	41
27.1	Figura 3.9 – Exemplo de como são definidos os máximos declives, à esquerda (linha vermelha), $s^L$ e à direita (linha azul), $s^R$ e o declive $S$ das diferenças centrais para um elemento $\phi_i$ [39] .....	41
28.1	Figura 4.1 – <i>Mapping</i> 2D para 3D [47]. ....	48
29.1	Figura 4.2 – a) Acoplamento entre duas malhas Lgrangiana e Euleriana, tempo = 0 ms, b) tempo = 0.15 ms, c) tempo = 0.5 ms [48]. ....	49
30.1	Figura 4.3 – Representação esquemática do algoritmo de acoplamento [48]. ..	50
31.1	Figura 4.4 – Comparação de uma onda de choque sem e com aplicação da viscosidade artificial [47] .....	52
32.1	Figura 4.5 – Tipos de <i>haurglass modes</i> para elementos com um ponto de integração. a) <i>Haurglass modes</i> para elementos 2D, quadriláteros [29]. b) <i>Haurglass modes</i> para elementos 3D, hexaedros [27] .....	55
33.1	Figura 5.1 – Malha de 56916 elementos do explosivo e do ar utilizada por Alia [37]. ....	58
34.1	Figura 5.2 – Comparação das curvas de pressão, numérica e experimental de um sensor localizado à 152.4 mm do centro do explosivo [37]. ....	59
35.1	Figura 5.3 – Configuração das quatro malhas geradas no ANSYS. ....	60
36.1	Figura 5.4 – Malha de 110000 elementos finitos com o formato de 1/8 de uma esfera. ....	60
37.1	Figura 5.5 – Curvas de pressão em função do tempo obtidos com os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell para as malhas 1, 2, 3 e 4. ....	63
38.1	Figura 5.6 – Comparação das curvas de pressão experimental e numérico do trabalho de Alia [37] com a curva de pressão obtida com a malha de 128000 elementos e o método de advecção de Donor Cell. ....	65
39.1	Figura 5.7 – Representação esquemática da caixa confinada do trabalho de Hu [5], com dimensões, x, y, z = 50, 30, 40 [cm] e com um sensor posicionado em x, y, z = 6, 25.5, 0 [cm]. ....	66
40.1	Figura 5.8 – Curva de pressão numérica do trabalho de Hu [5] comparada com a curva de pressão experimental do trabalho de Zyskowski [7], para o sensor localizada na posição x, y, z = 6, 25.5, 0 [cm] da caixa. ....	67



41.1	Figura 5.9 – Malha de elementos finitos 3D com dimensões (x, y, z) = (50,30,40) e com elementos uniformes de tamanho = 1,25 cm. ....	69
42.1	Figura 5.10 – Simulação da explosão do alto-explosivo TNT com o método de advecção de Donor Cell na malha 2D com tamanho de elementos igual à 0.04 cm. a) Tempo de simulação = 0 $\mu$ s; b) Tempo de simulação = 30 $\mu$ s.....	70
43.1	Figura 5.11 – Mapeamento dos dados do modelo 2D no centro do chão do modelo 3D.....	71
44.1	Figura 5.12 – Propagação da onda de choque gerada na detonação do alto explosivo TNT dentro do modelo numérico da caixa confinada, simulada com o método de advecção de Donor Cell: a) No instante de tempo t = 149 $\mu$ s; b) No instante de tempo t = 239 $\mu$ s; c) No instante de tempo t = 484 $\mu$ s. ....	73
45.1	Figura 5.13 – Curvas de pressão em função do tempo obtidos com os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell para as malhas de elementos finitos dos casos 1, 2 e 3 da Tabela 5.12. ....	74
46.1	Figura 5.14 – Comparação das curvas de pressão experimental e numérico do trabalho de Hu [5] com as curvas de pressão obtidas nos casos 1, 2 e 3 da Tabela 5.12: a) Caso 1; b) Caso 2; c) Caso 3. ....	76
47.1	Figura 5.15 – a) Malha numérica do ar e da caixa, b) Ilustração da malha da caixa contida dentro da malha das massas fluidas. ....	78
48.1	Figura 5.16 – Curvas de pressão em função do tempo obtidos com os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell para as malhas de elementos finitos dos casos 1, 2 da Tabela 5.13.....	80
49.1	Figura 5.17 - Comparação das curvas de pressão experimental e numérico do trabalho de Hu [5] com as curvas de pressão obtidas com os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell nos casos 1, 2 da Tabela 5.13: a) Caso 1; b) Caso 2. ....	81
50.1	Figura 6.1 – Localização dos sensores nos modelos numéricos dos compartimentos. a) Compartimento 1; b) Compartimento 3. ....	86
51.1	Figura 6.2 – Comparação das curvas de pressão em função do tempo dos sensores 3 e 5 para os cinco compartimentos: a) compartimento 1, b) Compartimento 2; c) compartimento 3; d) Compartimento 4; e) Compartimento 5;.....	91
52.1	Figura 6.3 – Distribuição de pressão nas zonas dos sensores 3 e 5. a) Distribuição de pressão no compartimento-1 para o instante t = 978 $\mu$ s; b) Distribuição de pressão no compartimento-2 para o instante t = 1030 $\mu$ s; c) Distribuição de pressão no compartimento-3 para o instante t = 219 $\mu$ s; d)	

	Distribuição de pressão no compartimento-4 para o instante $t = 170 \mu s$ ; e)	
	Distribuição de pressão no compartimento-5 para o instante $t = 130 \mu s$ .....	95
53.1	Figura 6.4 – Pressão quase-estática. a) Compartimento-1 sensor 16; b) Compartimento-2 sensor 16. ....	96
54.1	Figura 6.5 – Distribuição das pressões nos compartimentos 1, 3 e 5 para as linhas de centro dos planos, superior, lateral e de frente: a) Distribuição de pressão na linha de centro do plano lateral (plano x) do compartimento 1; b) Distribuição de pressão nas linhas de centro dos planos, superior (plano y), lateral (plano x) e de frente (plano z) do compartimento 3; c) Distribuição de pressão nas linhas de centro dos planos, superior (plano y), lateral (plano x) e de frente (plano z) do compartimento 5. ....	98
55.1	Figura 6.6 – Comparação da distribuição da pressão nas linhas de centro dos planos laterais, inferior ou superior e de frente ou trás do compartimento 1 com a distribuição de pressão prevista com o manual da UFC [6]. ....	99
56.1	Figura 6.7 – Análise regressiva linear da pressão em função da relação x/z dos compartimentos para o sensor 3. ....	100
57.1	Figura 6.8 – Análise regressiva linear da pressão em função da relação x/z dos compartimentos para o sensor 5. ....	101
58.1	Figura 6.9 – Análise regressiva linear da pressão em função da distância entre o ponto de detonação do explosivo e o sensor 3 para os cinco compartimentos. ....	102
59.1	Figura 6.10 – Análise regressiva linear da pressão em função da distância entre o ponto de detonação do explosivo e o sensor 5 para os cinco compartimentos. ....	102

## Índice de tabelas

60.1	Tabela 2.1 – Parâmetros de uma onda de choque relacionados com o fator de escala ( $\lambda$ ). [19].	17
61.1	Tabela 2.2 – Categoria de carregamento de explosão [6].	18
62.1	Tabela 3.1 – Parâmetros de integração do método $\beta$ de Newmark [29].	30
63.1	Tabela 5.1 – Resultados numéricos e experimentais (intensidade do pico de pressão e o tempo de chegada do pico de pressão) do trabalho de Alia [37].	58
64.1	Tabela 5.2 – Número de elementos das quatro malhas utilizadas neste problema.	59
65.1	Tabela 5.3 – Parâmetros para a EOS de JWL do explosivo C-4 [37].	61
66.1	Tabela 5.4 – Parâmetros para o modelo de material MAT-HIGH_EXPLOSIVE_BURN do explosivo C-4 [37].	61
67.1	Tabela 5.5 – Parâmetros da EOS polinomial linear para o ar [37].	62
68.1	Tabela 5.6 Parâmetros do modelo de material, MAT_NULL para o ar [37].	62
69.1	Tabela 5.7 – Resultados obtidos com as quatro malhas com os métodos de advecção de Van Leer e Donor Cell.	63
70.1	Tabela 5.8 – Erros relativos entre os resultados experimentais e os resultados numéricos, para ambos os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell.	64
71.1	Tabela 5.9 – Tamanhos dos elementos e dimensões das malhas 2D e 3D.	68
72.1	Tabela 5.10 – Parâmetros para a EOS de JWL do explosivo TNT [1].	70
73.1	Tabela 5.11 – Parâmetros para o modelo de material MAT-HIGH_EXPLOSIVE_BURN do explosivo TNT [1].	70
74.1	Tabela 5.12 – Resultados obtidos com os métodos de advecção de Van Leer e Donor Cell para as três combinações de malhas 2D e 3D.	74
75.1	Tabela 5.13 – Dimensões e tamanho dos elementos das malhas das massas fluidas e da estrutura.	77
76.1	Tabela 5.14 – Os parâmetros do modelo de material do aço [26].	79
77.1	Tabela 5.15 – Resultados obtidos com os métodos de advecção de Van Leer e Donor Cell para as duas malhas 3D com tamanhos de elementos igual à 1.25 cm e 0.5 cm.	80
78.1	Tabela 6.1 – Dados relativamente as dimensões dos cinco compartimentos e massa do explosivo.	83
79.1	Tabela 6.2 – Dimensões dos modelos dos cinco compartimentos e massa do explosivo para um fator de escala de $\lambda = 0,25$ .	84

80.1	Tabela 6.3 – Dimensões e tamanhos de elementos para as malhas 2D e 3D dos fluidos e dimensões e número de elementos para as malhas dos cinco compartimentos.....	85
81.1	Tabela 6.4 – Posição dos 19 sensores para o compartimento-1. ....	87
82.1	Tabela 6.5 – Posição dos 19 sensores para a compartimento-2. ....	87
83.1	Tabela 6.6 – Posição dos 19 sensores para a compartimento-3. ....	88
84.1	Tabela 6.7 – Posição dos 19 sensores para a compartimento-4. ....	88
85.1	Tabela 6.8 – Posição dos 19 sensores para a compartimento-5. ....	89
86.1	Tabela 6.9 – Resultados das máximas pressões registadas nos compartimentos 1, 2, 3, 4 e 5, o tempo em que ocorre essas pressões, a relação $x/z$ dos compartimentos e distância entre o ponto de detonação do explosivo e o sensor onde foi registada a pressão máxima para cada compartimento. ....	90
87.1	Tabela 6.10 – Pressões registadas nos sensores 3 e 5 para os cinco compartimentos e os valores da relação $x/z$ dos compartimentos.....	100
88.1	Tabela 6.11 – Resultados das pressões máximas registadas para cada compartimento, relativamente ao posicionamento do explosivo. ....	104
89.1	Tabela 6.12 – Análises de regressão .....	105
90.1	Tabela 6.13 – Estimativas das pressões. ....	107



# Capítulo 1     Introdução

## 1.1   Motivação e Objetivos

O estudo da resposta numérica e experimental de estruturas sujeitas a carregamentos explosivos é um tópico de investigação que tem vindo a ser muito abordado por diversos autores nas últimas 5 décadas [1]. O risco resultante da exposição a uma explosão está presente em muitas indústrias, mas também no dia-a-dia da sociedade perante a ameaça terrorista, já materializada de forma dramática em algumas ocasiões. Ataques terroristas utilizando engenhos explosivos são possíveis em infraestruturas críticas, tais como edifícios governamentais, centrais nucleares, aviões, navios ou mesmo, como já sucedeu, em eventos de natureza puramente civil [2]. Estas ocorrências de explosões acidentais ou deliberadas vêm colocando à engenharia cada vez maiores desafios relativos à conceção de soluções que aumentem a proteção de tais infraestruturas contra os efeitos das explosões [3].

Explosões em espaços confinados, como por exemplo em túneis, em aviões ou em compartimentos de navios podem aumentar em uma ordem de grandeza ou mais a magnitude da onda de choque provocada pela explosão em comparação com explosões ocorridas em espaços abertos, produzidos pela mesma massa do explosivo [3]–[5]. O estudo do efeito das ondas de choque em espaços confinados é de interesse para a avaliação da vulnerabilidade de edifícios e veículos aéreos e marítimos.

No caso particular de navios e pequenas embarcações é desejável a existência de regras e doutrina de projeto capazes de fornecer aos engenheiros a informação necessária que assegure a sua proteção adequada, face aos riscos de explosões a que estes estão sujeitos quando envolvidos em missões de prevenção e de repressão de atividades criminosas como contrabando, tráfico de entorpecentes, armas e seres humanos ou a prevenção da atividade terrorista.

O número de trabalhos sobre proteção de estruturas para resistirem aos efeitos de uma explosão confinada, disponível publicamente, é muito reduzido e a informação relacionada é geralmente classificada estando apenas acessível a instituições no âmbito da defesa nacional e forças armadas [3].

O UFC 3-340-02 (UNIFIED FACILITIES CRITERIA) [6] é um manual técnico do Departamento do Exército dos EUA, Marinha e Força Aérea que está disponível ao público, e que apresenta métodos empíricos para projetar estruturas capazes de resistir aos efeitos de uma explosão confinada.

Alguns trabalhos têm-se baseado na utilização da simulação numérica para investigar os efeitos de uma onda de choque dentro de um espaço confinado. Hu [5] utiliza o hidrocódigo AUTODYN para efetuar um estudo paramétrico sobre uma explosão dentro de um espaço confinado. Os resultados do AUTODYN foram calibrados utilizando dados experimentais obtidos por Zyskowski [7]. Nesse estudo, foi investigada a variação da pressão com a localização do explosivo no interior de uma caixa fechada (utilizando sensores para medir a pressão em diferentes posições da caixa) fazendo também variar a forma do explosivo (cilíndrica e esférica), a orientação do explosivo (vertical e horizontal) e a massa do mesmo. Foi também efetuada uma comparação com os resultados das pressões obtidas a partir do UFC-3-340-02 [6]. O modelo numérico foi também utilizado para investigar os efeitos da forma, orientação, relação entre comprimento e diâmetro (L/D) de uma carga explosiva cilíndrica, bem como os efeitos da geometria da caixa (retangular, cúbica e cilíndrica) e do seu volume, na distribuição da pressão no interior da caixa.

Wu [4] conduziu um estudo experimental consistindo em quatro eventos de explosões dentro de uma estrutura de aço, em que se utilizou num deles uma carga explosiva esférica e nos restantes, três cargas explosivas cilíndricas. Os resultados experimentais foram utilizados para calibrar o hidrocódigo AUTODYN com o objetivo de gerar um modelo numérico capaz de ser utilizado para conduzir um estudo paramétrico das variações das pressões e impulsos nas paredes de uma caixa fechada. Os resultados das simulações foram utilizados para obter um método de estimativa da pressão e do impulso de uma carga explosiva cilíndrica nas paredes da caixa.

Neste trabalho, pretende-se dar um novo contributo neste tipo de investigação, tendo como objetivo contribuir para a análise da vulnerabilidade de navios e pequenas embarcações, tendo-se procurado definir uma relação fenomenológica que permita estimar as pressões máximas geradas pela detonação de um alto-explosivo dentro de um compartimento fechado, considerando as variações do posicionamento do explosivo e as variações das dimensões do compartimento assumido.

O principal objetivo desta tese foi então o de, através do LS-DYNA, desenvolver um método de modelação, que permitisse o adequado tratamento e simulação deste tipo de problemas envolvendo ondas de choque explosivas provenientes da detonação em espaço fechado de um alto-explosivo.

No âmbito da realização deste estudo foi necessário calibrar a utilização da formulação multimaterial Arbitrária Lagrangiana-Euleriana (MMALE) implementada no LS-DYNA e calibrar o modelo geométrico escolhido bem como os parâmetros utilizados para gerar a onda de choque explosiva, em que se recorreu a resultados experimentais da literatura consultada por forma a assegurar a consistência dos resultados, dado que não foi possível a realização de ensaios experimentais.

## 1.2 Estrutura da tese

A presente tese está dividida em sete capítulos:

- **Capítulo 1:** Neste primeiro capítulo, contextualiza-se o tema e refere-se a motivação para a realização desta tese. Apresentam-se ainda os objetivos da mesma e a estrutura segundo a qual foi organizada;
- **Capítulo 2:** Faz-se uma revisão da teoria da explosão e dos explosivos, do processo de detonação e da onda de pressão gerada na mesma;
- **Capítulo 3:** Faz-se uma breve descrição do *software* LS-DYNA e faz-se um estudo teórico dos métodos numéricos utilizados nesta tese, com especial ênfase para o método Arbitrário Lagrangiano-Euleriano;
- **Capítulo 4:** Neste capítulo descrevem-se as técnicas numéricas, mais relevantes para esta tese, implementadas no LS-DYNA para simular uma explosão;
- **Capítulo 5:** Neste capítulo, discute-se a capacidade do programa de elementos finitos, LS-DYNA, em simular corretamente problemas de explosões utilizando a metodologia Arbitrária Lagrangiana-Euleriana (ALE) e calibra-se o modelo numérico utilizado para realizar o estudo paramétrico da detonação de um alto-explosivo num espaço confinado;
- **Capítulo 6:** Realização do estudo paramétrico, apresentação e análise dos resultados.
- **Capítulo 7:** Conclusão dos resultados obtidos e recomendações futuras.





## Capítulo 2 Estado da arte

### 2.1 Explosão

Uma explosão pode ser definida como uma súbita conversão de energia potencial (química ou mecânica) em energia cinética, acompanhada pela produção e libertação de um grande volume de gases cuja rápida expansão irá provocar um forte aumento de pressão, que se irá propagar através do material circundante (ou poderá também dever-se à súbita libertação de um gás fortemente comprimido, como no caso do rebentamento de um reservatório sob pressão). Os gases, expandindo-se a alta velocidade e pressão realizam trabalho mecânico nos materiais que encontram no seu caminho, podendo movê-los, deformá-los ou mesmo provocar a sua ruína [8].

As explosões podem ser caracterizadas de acordo com três tipos [8],[9]:

1. Químicas:

Reação química (combustão extremamente rápida) de um material energético, sob a forma de uma detonação, ou no caso de reações mais lentas, sob a forma de deflagração;

2. Mecânicas:

Reação física tal como a que ocorre com a rotura de um reservatório sob pressão;

3. Nucleares:

Explosão resultante da uma reação nuclear como a fissão ou a fusão nuclear.

#### 2.1.1 Explosão química

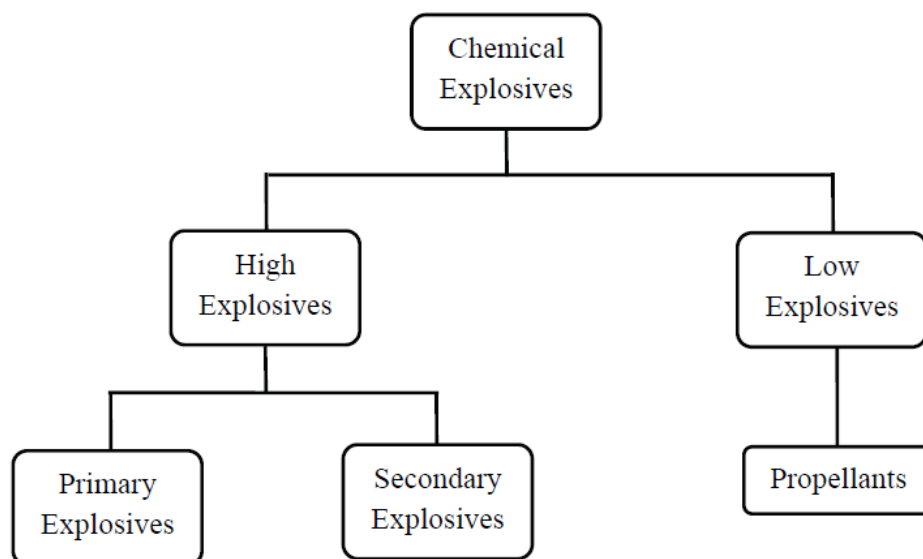
Uma explosão química é causada pela conversão extremamente rápida de um composto explosivo, sólido ou líquido, em gases. Os gases gerados na explosão química possuem um volume muito superior ao dos produtos que lhes deram origem, 10000-15000 vezes maior que o volume dos seus reagentes. Todos os explosivos fabricados pelo homem, com exceção dos explosivos atômicos são explosivos químicos [10]. Neste trabalho só serão abordadas explosões envolvendo explosivos químicos.

## 2.2 Explosivos

Um explosivo é um composto químico, em geral uma mistura de vários componentes, que ao ser estimulado por calor, fricção, choque ou por aplicação de um outro tipo de pulso de energia irá reagir sob a forma de uma combustão extremamente rápida, libertando grandes quantidades de energia [11].

Os explosivos podem ser caracterizados de acordo com a sua performance e a sua sensibilidade à detonação perante um estímulo mecânico ou térmico [11], [12]. Na Figura 2.1 pode-se ver que de acordo com esta classificação os explosivos se podem dividir em três classes:

- Explosivos primários;
- Explosivos secundários;
- Propelentes.



**Figura 2.1** – Classificação dos explosivos de acordo com a sua performance e sensibilidade [12].

### 2.2.1 Explosivos primários

Os explosivos primários são muito sensíveis a um estímulo térmico ou mecânico, e detonam facilmente sob o efeito desses estímulos, como por exemplo um choque mecânico, uma faísca elétrica ou a exposição a altas temperaturas, podendo a velocidade de detonação atingir entre 3500 à 5500 m/s [12]. A detonação desses explosivos produz calor e/ou choque que poderá ser utilizado para acionar um explosivo secundário [12], [13]. São exemplos de explosivos primários o fulminato de mercúrio, a azida de chumbo e a sulfeto de nitrogênio [14].

### 2.2.2 Explosivos secundários

Os explosivos secundários, ao contrário dos primários são muito mais estáveis e não detonam facilmente sob os estímulos térmicos ou mecânicos [11], [12]. São normalmente, iniciados por intermédio da onda de choque produzida por um explosivo primário [13]. Os explosivos secundários apresentam valores de velocidade de detonação na gama de 5500 à 9000 m/s [12]. Alguns exemplos de explosivos secundários são o trinitrotolueno (TNT), a dinamite, trotil, ácido pícrico, nitroglicerina, ciclotrimetilenotrinitramina (RDX) [14].

### 2.2.3 Propelentes

Propelentes são materiais combustíveis que contêm na sua composição o oxigénio, necessário para a sua combustão. Os propelentes não detonam embora a sua combustão possa ser suficientemente rápida para que se considerem explosivos. O tipo de reação associado é normalmente designado por deflagração, devido aos regimes mais lentos de velocidade de reação (centenas de metros por segundo [15]). Pode-se dizer simplesmente que queimam [11], [12]. São exemplos de propelentes, pólvora negra e a pólvora sem fumaça [12], [14]

## 2.3 O processo da detonação

Para descrever o fenómeno da detonação de um explosivo consideram-se os dois modelos teóricos proposto por Zeldovitch, Von Neumann e Deering (modelo ZND) e por Chapman-Jouguet (modelo CJ).

### 2.3.1 Modelo de ZND

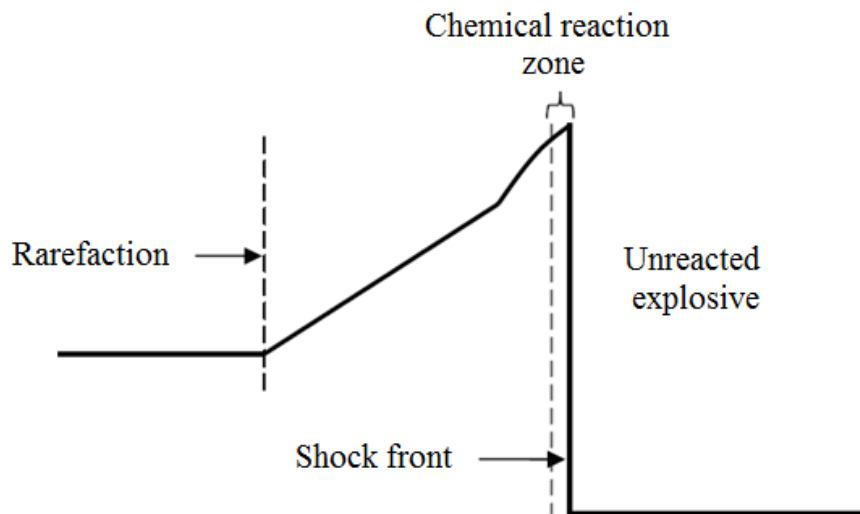
O modelo de ZND (Figura 2.2) assume as seguintes simplificações [12], [16]:

1. O modelo consiste numa frente de onda planar com um fluxo uniaxial e sem condições de fronteiras na direção perpendicular à frente de onda;
2. A frente da onda de detonação é descontínua;
3. Os gases produzidos atrás da frente de onda da detonação estão em equilíbrio químico e termodinâmico e a reação química é completa, isto é, os gases produzidos expandem como um fluxo inerte<sup>1</sup>;
4. O comprimento da zona da reação química é igual a zero;

---

<sup>1</sup> Um fluxo inerte é um fluxo que não é reativo, isto é, onde não podem ocorrer mais reações durante o seu processo de expansão.[12].

5. O processo da detonação é um estado estacionário e por isso, a taxa de detonação ou a velocidade de detonação são constantes.



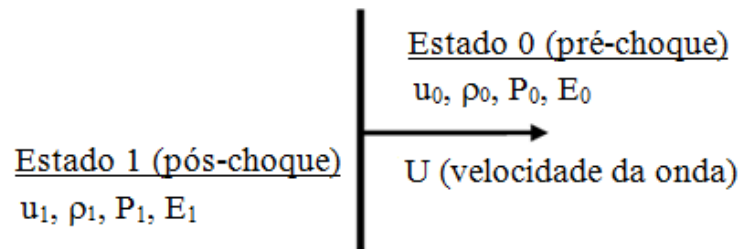
**Figura 2.2** – Modelo físico de uma onda de detonação [12].

A zona da reação química do modelo apresentado na Figura 2.2 é apenas para fins explicativos, assumindo-se que o seu comprimento é igual a zero. Neste modelo existe uma onda de rarefação atrás da onda de choque que representa a expansão dos produtos da detonação [5].

Tendo em conta as simplificações assumidas pelo modelo ZND, a detonação pode ser definida como uma reação exotérmica que ocorre num material explosivo devido à ação de uma onda de choque. A onda de choque comprime e aumenta a temperatura do explosivo acima do seu ponto de ignição provocando uma reação química numa zona imediatamente atrás da onda de choque, conhecida como zona de reação. A energia produzida pela reação sustenta e impulsiona a frente da onda de choque. Ao mesmo tempo os produtos gasosos da reação expandem e formam uma onda de rarefação que move juntamente com a onda de choque. A frente da onda de choque, a reação química e o bordo de ataque da onda de rarefação estão todos em equilíbrio, movendo-se à mesma velocidade, que se denomina velocidade de detonação. A detonação é pois um processo em estado estacionário, a frente da onda de choque não altera a sua forma (a pressão permanece constante) e a velocidade não altera com o tempo [12], [16].

### 2.3.2 Modelo CJ

O modelo CJ considera que a frente da onda de detonação é um plano descontínuo, e que essa onda transforma instantaneamente um material em estado de pré-choque num material em estado de pós-choque (Figura 2.3). A velocidade ( $u$ ), massa específica ( $\rho$ ), pressão ( $P$ ) e energia ( $E$ ) do material alteram-se instantaneamente desse estado inicial (pré-choque) para o estado final (pós-choque) quimicamente estável e em equilíbrio termodinâmico aquando da passagem da onda de detonação [17].



**Figura 2.3** – Modelo da onda de detonação de Chapman-Jouguet [17].

As equações de conservação de massa, momento e energia são utilizadas para calcular as alterações de velocidade, massa específica, energia e pressão sofridas por um material ao ser atravessado por uma onda de choque [12], [16], [17].

#### 2.3.2.1 As equações de Rankine-Hugoniot

As equações de conservação de massa, momento e energia são em conjunto denominadas por equações de Rankine-Hugoniot [16], [18].

##### 2.3.2.1.1 Conservação de massa

Considere-se uma onda de choque propagando-se num volume de controlo tal como se ilustra na Figura 2.4. A lei da conservação da massa estabelece que a massa do material ( $m$ ) permanece constante após a passagem da onda de choque:

$$m = \rho \cdot V = \text{Constante} \quad (2.1)$$

Onde,  $\rho$  é a massa específica e  $V$  é o volume. O volume pode ser obtido pela expressão (2.2):

$$V = A \cdot L \quad (2.2)$$

$A$  é a área da secção do volume de controlo (permanece constante durante a passagem da onda de choque) e  $L$  é a distância que uma partícula move relativamente à onda de choque, isto é, o produto da velocidade relativa entre a partícula e a frente da onda e o tempo que leva a percorrer essa distância:

$$L = (U - u) \cdot t \quad (2.3)$$

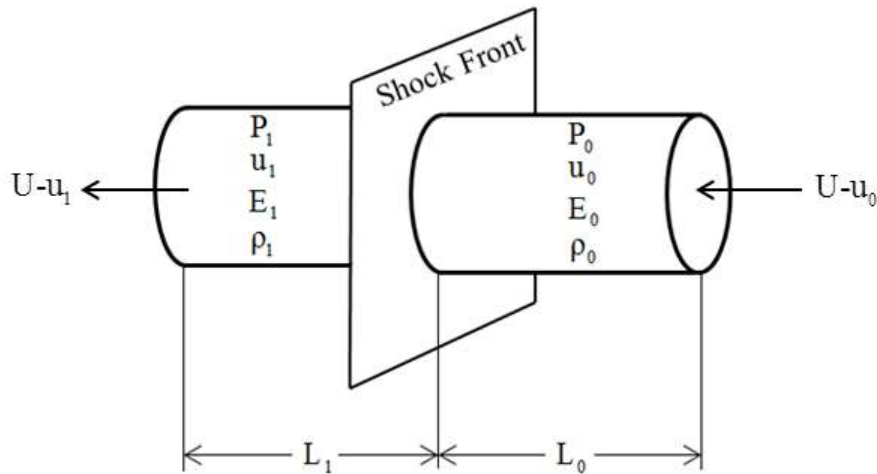
$U$  é a velocidade da onda e  $u$  é a velocidade da partícula.

O material na região à frente da onda de choque possui massa específica  $\rho_0$ . Após uma unidade de tempo a frente da onda de choque que se desloca a uma velocidade  $(U)$  comprime a massa do material à sua frente de um volume inicial para um volume final, por isso a massa específica aumenta de  $\rho_0$  para  $\rho_1$ . Com base na lei de conservação de massa, obtém-se a equação de balanço de massa (expressão(2.6)):

$$\rho_0 \cdot V_0 = \rho_1 \cdot V_1 \quad (2.4)$$

$$\rho_0 A t (U - u_0) = \rho_1 A t (U - u_1) \quad (2.5)$$

$$\rho_0 (U - u_0) = \rho_1 (U - u_1) \quad (2.6)$$



**Figura 2.4** – Onda de choque propagando num volume de controlo [16].

### 2.3.2.1.2 Conservação de momento

O balanço do momento estabelece que a taxa de variação do momento ( $Taxa = (mu_1 - mu_0)/t$ ), para o material passar do estado de pré-choque para o estado de pós-choque, é igual à força exercida pela onda de choque no material ( $F = A(P_1 - P_0)$ ):

$$A(P_1 - P_0) = (mu_1 - mu_0)/t \quad (2.7)$$

$$A(P_1 - P_0) = [\rho_1 A t u_1 (U - u_1) - \rho_0 A t u_0 (U - u_0)]/t \quad (2.8)$$

$$P_1 - P_0 = \rho_1 u_1 (U - u_1) - \rho_0 u_0 (U - u_0) \quad (2.9)$$

$$P_1 - P_0 = \rho_1 u_1 (U - u_1) - \rho_0 u_0 (U - u_0) \quad (2.10)$$

### 2.3.2.1.3 Conservação de energia

A onda de choque realiza um trabalho compressivo por unidade de tempo sobre o material ( $W/t = P_1 A u_1 - P_0 A u_0$ ). A energia recebida pelo material por unidade de tempo é a soma da energia cinética ( $E_c/t = (\frac{1}{2} \rho_1 A L_1 u_1^2 - \frac{1}{2} \rho_0 A L_0 u_0^2)/t$ ) e da energia interna ( $E_i/t = (\rho_1 A L_1 e_1 - \rho_0 A L_0 e_0)/t$ ). A lei de conservação de energia requer que a taxa de aumento de energia do material seja igual ao trabalho por unidade de tempo exercido no material.

$$P_1 A u_1 - P_0 A u_0 = (\frac{1}{2} \rho_1 A L_1 u_1^2 - \frac{1}{2} \rho_0 A L_0 u_0^2)/t + (\rho_1 A L_1 e_1 - \rho_0 A L_0 e_0)/t \quad (2.11)$$

Sabendo que  $L = (U - u) \cdot t$ , obtém-se a expressão (2.12). A expressão do balanço de energia (2.13) é obtida tendo em conta que, do balanço de massa,  $\rho_1 (U - u_1) = \rho_0 (U - u_0)$ .

$$P_1 u_1 - P_0 u_0 = \rho_1 (U - u_1) \left( e_1 + \frac{1}{2} u_1^2 \right) - \rho_0 (U - u_0) \left( e_0 + \frac{1}{2} u_0^2 \right) \quad (2.12)$$

$$e_1 - e_0 = \frac{P_1 u_1 - P_0 u_0}{\rho_0 (U - u_0)} - \frac{1}{2} (u_1^2 - u_0^2) \quad (2.13)$$



As equações de Rankine-Hugoniot (equações (2.6), (2.10) e (2.13)) envolvem cinco variáveis,  $(\rho, P, e, u, U)$  se for conhecido o estado inicial do material (estado de pré-choque). Como o número de variáveis é superior ao número de equações, é necessário uma relação adicional para resolver o sistema de equações. Esta relação é definida por uma equação de estado (EOS) e é específica para o material sujeito ao choque [19].

A equação de estado (EOS) descreve o comportamento dos gases em expansão gerados na detonação, pode ser definida por uma lei física ou como uma relação empírica determinada por dados experimentais [12], [19]. A EOS é escrita em termos da energia interna, pressão e volume específico:

$$e = f(P, v) \quad (2.14)$$

Se a EOS for combinado com a equação de conservação de energia (equação (2.13)), então o termo da energia pode ser eliminado e obtém-se uma relação entre pressão e volume específico:

$$P = f(v) \quad (2.15)$$

A equação (2.15) é denominada de equação de Hugoniot [16].

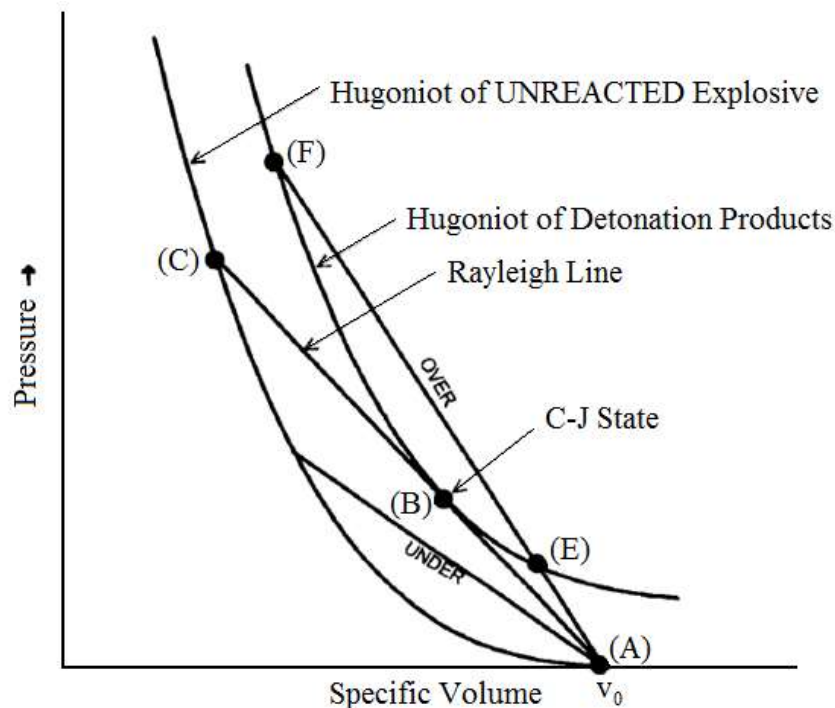
### 2.3.2.2 Estado de Chapman-Jouguet

Considere-se o gráfico que representa a detonação no plano P-v (pressão-volume específico) apresentado na Figura 2.5. A curva Hugoniot dos explosivos não reagidos (*Hugoniot of unreacted explosive*) é a curva que representa todos os estados de equilíbrio possíveis em que um material explosivo pode existir. A Hugoniot dos produtos da detonação (*Hugoniot of detonation products*) é a curva que representa os estados dos produtos gasosos da detonação [16], [17]. A reta que liga o estado inicial (ponto A) e o estado final (ponto C) no plano P-v e que é tangente à Hugoniot dos produtos da detonação (ponto B) é a reta de Rayleigh e representa a condição de descontinuidade [7].

A equação (2.16), equação de Rayleigh é obtida pela combinação das equações de conservação de massa e de conservação de momento (equações (2.6) e (2.10)), onde  $U$  é a velocidade da onda de detonação,  $\rho$  é a massa específica,  $P$  é a pressão,  $v$  é o volume específico ( $v=1/\rho$ ) e os índices 1 e 0 correspondem aos estados, final e inicial, respetivamente. O declive da reta de Rayleigh depende da velocidade da onda ( $U$ ) e é dada pela equação (2.17) [16], [17].

$$P = P_0 + (\rho_0 U)(v_0 - v_1) \quad (2.16)$$

$$\text{Declive} = \rho_0^2 U^2 \quad (2.17)$$

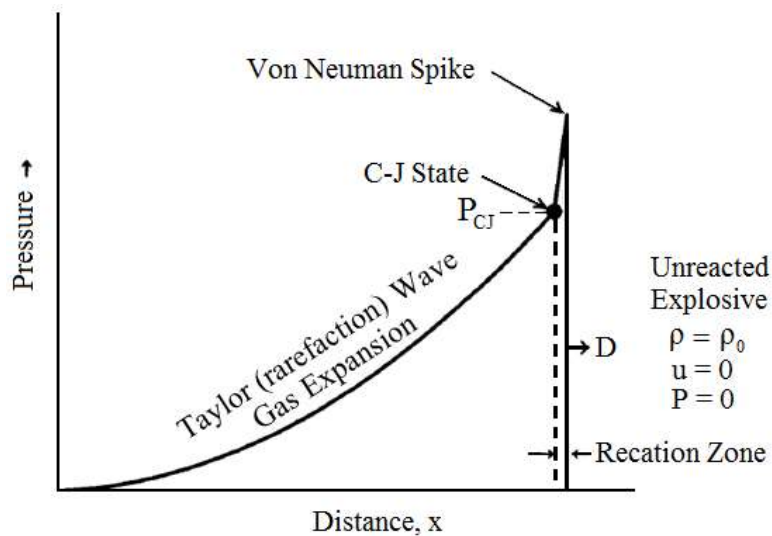


**Figura 2.5** – Representação da detonação no plano P-v [16].

O estado de Chapman-Jouguet é no ponto onde a reta de Rayleigh é tangente à Hugoniot dos produtos da detonação [16], [18]. Esse estado define as condições de uma detonação ideal (autossustentada e estacionária) [17].

### 2.3.3 Perfil de uma onda de detonação

A Figura 2.6 ilustra como a pressão varia em função da distância à medida que a onda de choque se propaga através do explosivo. O pico de pressão na frente da onda de choque é conhecido como o pico de Von Neuman (“*Von Neuman spike*”) e é o estado em que se inicia a reação química no explosivo. A zona por de trás deste pico é a zona de reação, onde se desencadeia a combustão do explosivo. No modelo considerado anteriormente (modelo ZND), o *Von Neuman spike* é ignorado e a zona de reação é assumido como sendo zero (a maioria dos explosivos tem um comprimento da zona de reação aproximadamente igual a 1 mm [12]). O ponto CJ no final da zona de reação representa o estado dos produtos da detonação. A onda de rarefação que descreve a expansão dos produtos da reação é conhecida como a onda de Taylor [12].



**Figura 2.6** – Curva pressão-distância de uma onda de detonação [12].

## 2.4 Fenómeno das ondas de choque no ar

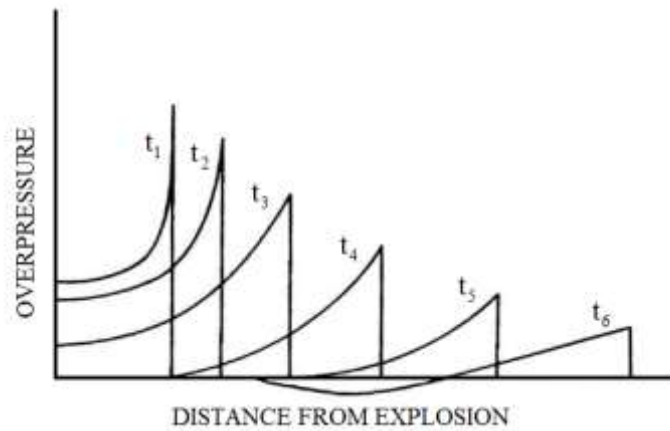
Quando um explosivo é detonado, os produtos gasosos gerados na reação podem atingir valores de temperaturas entre os 3000 e 4000 °C e valores de pressões que variam entre os 100 a 300 KBar [20]. Os gases gerados na reação atuam como um pistão no meio ambiente, formando ondas de choque que comprimem e aumentam a temperatura do ar [21]. Na Figura 2.7, é perceptível o efeito causado pela explosão no ar.



**Figura 2.7** – Detonação de 500 ton de um alto-explosivo no ar [20].

A onda de choque gerada no ar é semelhante a onda de choque gerada num explosivo, há um aumento descontínuo de pressão, massa específica, temperatura e velocidade do ar aquando da passagem da onda de choque [22]. Os estados de pré e pós choque são descritos pelas equações de Rankine-Hugoniot (equações (2.6), (2.10) e (2.13)) [22].

A variação da pressão em função da distância da fonte da explosão é similar à representada na Figura 2.8 para uma onda de choque ideal [3].

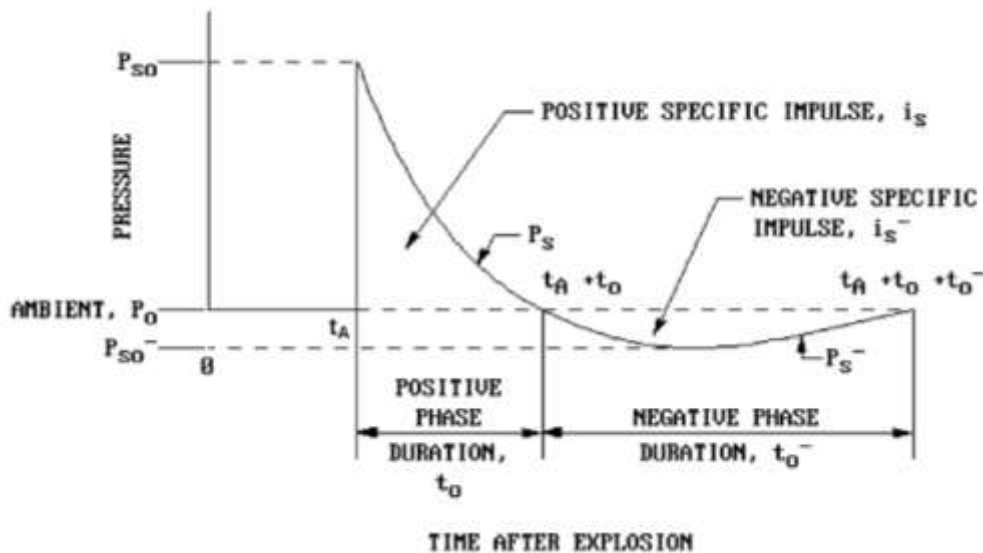


**Figura 2.8** – Variação da pressão em função da distância da explosão [3].

A onda de choque decresce à medida que se afasta da fonte da explosão e após algum tempo, a pressão atrás da frente da onda de choque reduz-se abaixo da pressão atmosférica [3].

#### 2.4.1.1 Perfil de uma onda de choque

Uma onda de choque gerada por uma explosão no ar em regime de detonação pode ser representada pela curva de Friedlander, que se ilustra na Figura 2.9 [12], [17], [23].



**Figura 2.9** – Representação esquemática do perfil da curva de pressão de uma onda de choque em função do tempo (curva de Friedlander) [6].

Como se pode ver na Figura 2.9, a onda de choque é caracterizada por um aumento quase instantâneo da pressão ambiente para um pico de sobre-pressão incidente,  $P_{so}$ . A sobre-pressão incidente decai exponencialmente para a pressão atmosférica no tempo  $t_o$ , que é a duração da fase positiva. A fase positiva é seguida por uma fase negativa com a duração de  $t_o^-$  que por sua vez é caracterizada por uma pressão negativa máxima (abaixo da pressão ambiente),  $P_{so}^-$ .

Os impulsos das pressões incidentes, positiva e negativa, associado à onda de choque são calculados pela integração das áreas das fases, positiva e negativa. O impulso positivo e negativo são obtidos pelas expressões (2.18) e (2.19), respetivamente [3], [13], [23].

$$i_s^+ = \int_{t_A}^{t_A+t_o} [P(t) - P_o] dt \quad (2.18)$$

$$i_s^- = \int_{t_A+t_o}^{t_A+t_o+t_o^-} [P_o - P(t)] dt \quad (2.19)$$

Onde,  $P(t)$  representa a relação pressão-tempo,  $P_o$  é a pressão ambiente,  $t_o$  é a duração da fase positiva,  $t_o^-$  é a duração da fase negativa e  $t_A$  é o tempo de chegada da onda de choque.

## 2.5 A lei de escala de Hopkinson e Cranz

A lei de escala de Hopkinson e Cranz estabelece que utilizando um fator de escala, é possível obter as mesmas propriedades para duas ondas de choque produzidas por duas cargas explosivas de igual geometria e tipo de explosivo, mas de massas diferentes, detonados na mesma atmosfera [13], [19].

Considere-se a Figura 2.10 que representa duas cargas explosivas esféricas de massas diferentes, em que,  $R$  é a distância do centro do explosivo e um ponto de interesse,  $W$  é a massa do explosivo e  $d$  é o diâmetro do explosivo, o fator de escala é calculado pela equação (2.20).

$$\lambda = \frac{R_2}{R_1} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{\sqrt[3]{W_2}}{\sqrt[3]{W_1}} \quad (2.20)$$

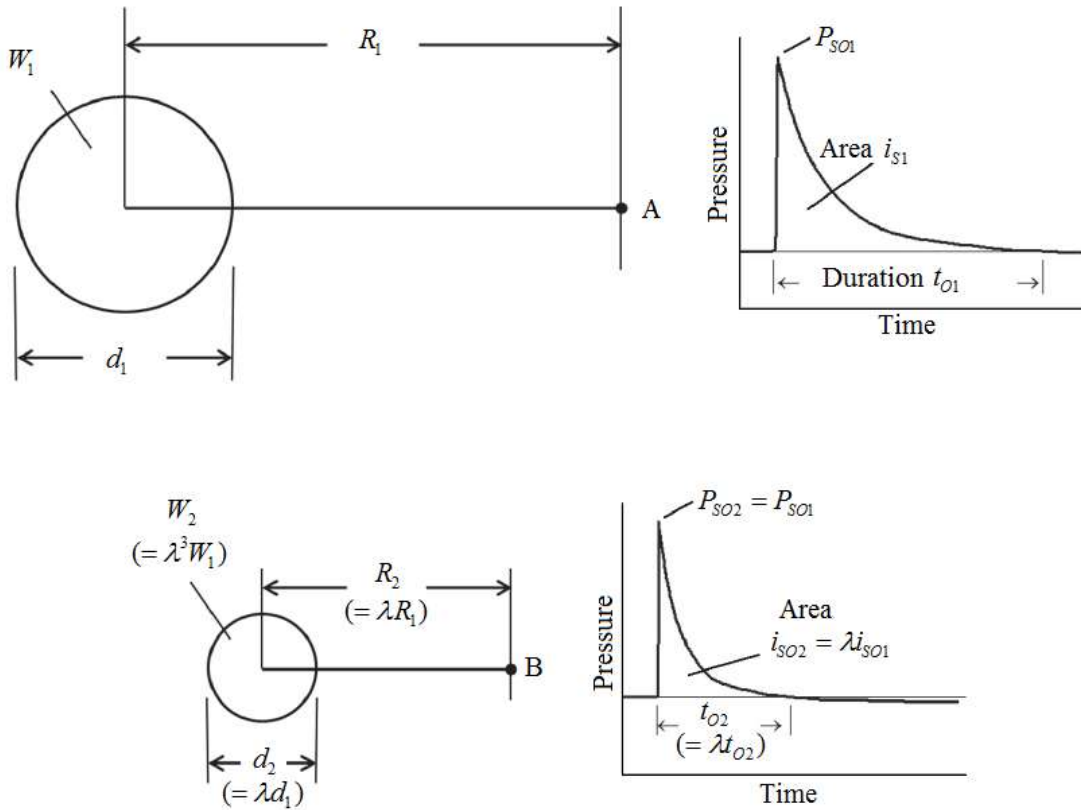
Na Tabela 2.1 apresenta-se alguns parâmetros de uma onda de choque relacionados com o fator de escala ( $\lambda$ ), onde,  $l$  representa o comprimento,  $\rho$  a massa específica,  $m$  a massa,  $t$  o tempo,  $v$  a velocidade,  $a$  aceleração,  $F$  força,  $P$  pressão e  $I$  o impulso.

**Tabela 2.1** – Parâmetros de uma onda de choque relacionados com o fator de escala ( $\lambda$ ). [19].

	$l$	$\rho$	$m$	$t$	$\nu$	$a$	$F$	$P$	$I$
Unidade-S.I	m	Kg/m <sup>3</sup>	kg	s	m/s	m/s <sup>2</sup>	Kg m/s <sup>2</sup>	Kg/m s <sup>2</sup>	Kg m/s
Símbolo	L	ML <sup>-3</sup>	M	T	LT <sup>-1</sup>	LT <sup>-2</sup>	MLT <sup>-2</sup>	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	MLT <sup>-1</sup>
Fator	$\lambda$	Const.	$\lambda^3$	$\lambda$	Const.	$\lambda^{-1}$	$\lambda^2$	Const.	$\lambda^3$

A lei de Hopkinson e Cranz também é expressa pela equação (2.21), onde  $Z$  é a distância escalada e é um parâmetro dimensional.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} [\text{m/kg}^{1/3}] \quad (2.21)$$



**Figura 2.10** – Propriedades de uma onda de choque relacionadas com o fator de escala para uma carga explosiva esférica [19].

## 2.6 TNT equivalente

O explosivo TNT é utilizado como referência no projeto de estruturas resistentes a explosão [3]. Para quantificar os efeitos da detonação de um outro explosivo diferente do TNT, a massa desse explosivo, com uma forma específica, deve ser convertida numa massa equivalente de TNT, com forma semelhante. Isto é conseguido pela multiplicação da massa do explosivo em questão por um fator de conversão [6], [15]. O fator de conversão representa a relação entre a energia produzida pelo explosivo considerado e a energia produzida pelo explosivo TNT (expressão (2.22)).

$$W_E = \frac{H_{EXP}^d}{H_{TNT}^d} W_{EXP} \quad (2.22)$$

Onde,  $W_E$  é a massa da carga efetiva,  $W_{EXP}$  é a massa do explosivo em questão,  $H_{EXP}^d$  é o calor específico do explosivo em questão,  $H_{TNT}^d$  é o calor específico do TNT.

## 2.7 Classificação de carregamentos explosivos

Carregamentos explosivos em estruturas podem ser divididos em dois principais grupos, baseando-se no confinamento da carga explosiva (explosões confinadas e explosões não confinadas) e podem ser subdivididos baseando-se no carregamento explosivo produzido dentro de uma estrutura ou atuando numa estrutura [6]. A Tabela 2.2 apresenta as categorias dos carregamentos explosivos.

**Tabela 2.2** – Categoria de carregamento de explosão [6].

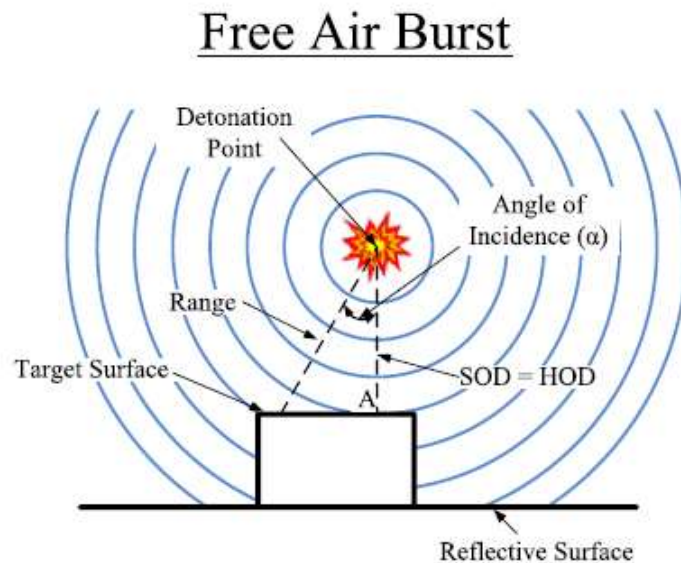
Categorias do carregamento explosivo	
Confinamento da carga	Categorias
Explosão não confinada	1. Free air burst
	2. Air burst
	3. Surface burst
Explosão confinada	4. Fully vented
	5. Partially confined
	6. Fully confined

As categorias dos carregamentos explosivos são qualitativamente definidos nas secções 2.7.1 e 0. Uma explicação mais profunda pode ser encontrada no manual da UFC [6]. Nesta tese, são estudadas as explosões totalmente confinadas, pelo que, dará mais ênfase a este tema.

## 2.7.1 Explosões não confinadas

### 2.7.1.1 *Free Air Burst*

É uma explosão que ocorre ao ar livre, em que a onda de choque se vai propagando através da atmosfera circundante, afastando-se do centro de detonação, até, eventualmente, atingir a estrutura alvo, não havendo amplificação da onda [6].



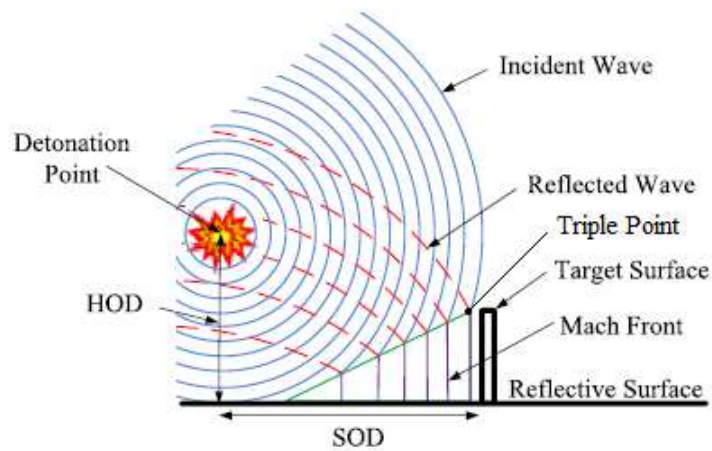
**Figura 2.11** – Representação esquemática da *free air burst* [24].

### 2.7.1.2 *Air Burst*

É uma explosão que ocorre acima da superfície do solo de maneira que a onda de choque inicial, propagando para longe da explosão, colide com a superfície do solo, gerando uma onda refletida mesmo antes de a onda de choque inicial colidir com a estrutura [6]. A onda refletida ao interferir com a onda incidente cria uma frente de onda vertical desde o solo até um ponto designado por *triple point* [3].



## Air Burst

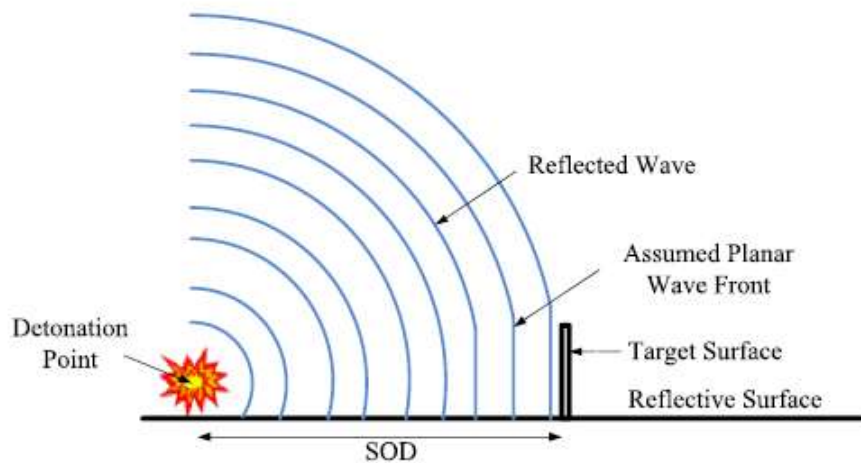


**Figura 2.12** – Representação esquemática da *air burst* [24].

### **2.7.1.3 Surface Burst**

É uma explosão que ocorre quando o ponto de detonação do explosivo está localizado próximo ou mesmo no solo, gerando uma onda de choque inicial amplificada devido as reflexões da onda no solo [6].

## Surface Burst



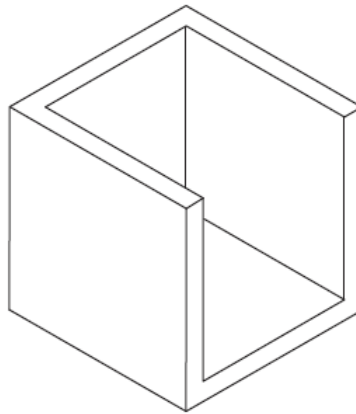
**Figura 2.13** – Representação esquemática da *surface burst* [24].

## 2.7.2 Explosões confinadas

### 2.7.2.1 *Fully Vented Blast*

É uma explosão que ocorre dentro de uma estrutura com uma ou mais superfícies abertas para a atmosfera. A onda de choque inicial é amplificada pelas superfícies da estrutura e acaba por se dissipar no exterior (*leakage pressure*), tais como os produtos da detonação são totalmente liberados para a atmosfera [6].

#### Fully Vented Blast

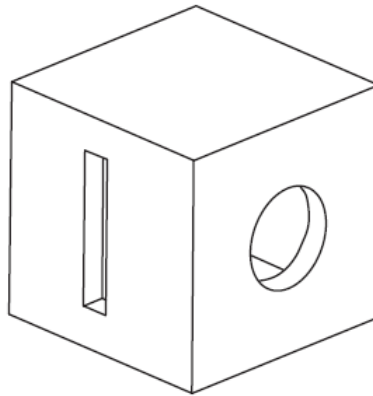


**Figura 2.14** – Representação esquemática de uma explosão *fully vented* [24].

### 2.7.2.2 *Partially Confined Blast*

É uma explosão que ocorre dentro uma estrutura fechada mas com uma abertura ou conjunto limitado de aberturas para a atmosfera. A onda de choque inicial vai ser amplificada pelas superfícies da estrutura e os produtos da detonação irão acabar por ser liberados para a atmosfera mas apenas após um período de tempo mais longo que no caso de uma explosão *fully vented* [6].

### Partially Vented Blast

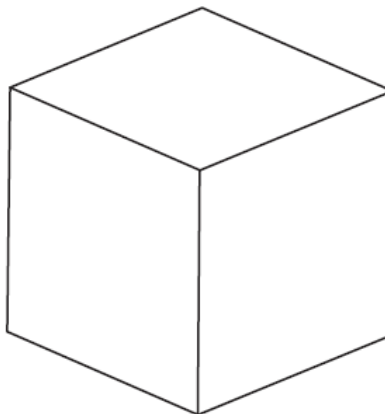


**Figura 2.15** – Representação esquemática de uma explosão *partially vented* [24].

#### **2.7.2.3 Fully Confined Blast**

Uma explosão totalmente confinada está relacionada com a total ou quase total contenção da explosão por uma estrutura. Os carregamentos internos irão consistir na onda de choque contida dentro da estrutura, nas ondas refletidas e num valor permanente de pressão interna, resultante da expansão dos produtos da reação gerados pela detonação do explosivo [6].

### Fully Confined Blast



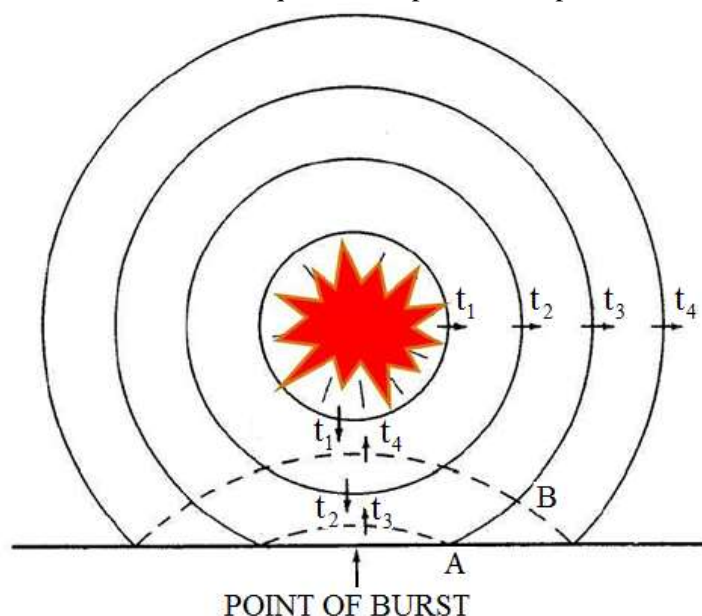
**Figura 2.16** – Representação esquemática de uma explosão *fully confined* [24].

## 2.8 Explosão num espaço confinado

Quando uma explosão ocorre dentro de uma estrutura, o pico de pressão associado à onda de choque sofre várias reflexões podendo ser amplificado por estas reflexões dentro da estrutura. Adicionalmente, e dependendo do grau de confinamento, os efeitos das altas temperaturas e da acumulação dos produtos gasosos produzidos pelo processo químico envolvido na explosão poderão provocar pressões adicionais e aumentarem a duração do carregamento dentro da estrutura. A combinação dessas pressões pode eventualmente destruir a estrutura, a não ser que esta seja projetada para resistir aos efeitos das pressões internas [6].

## 2.9 Reflexão de uma onda de explosão numa superfície

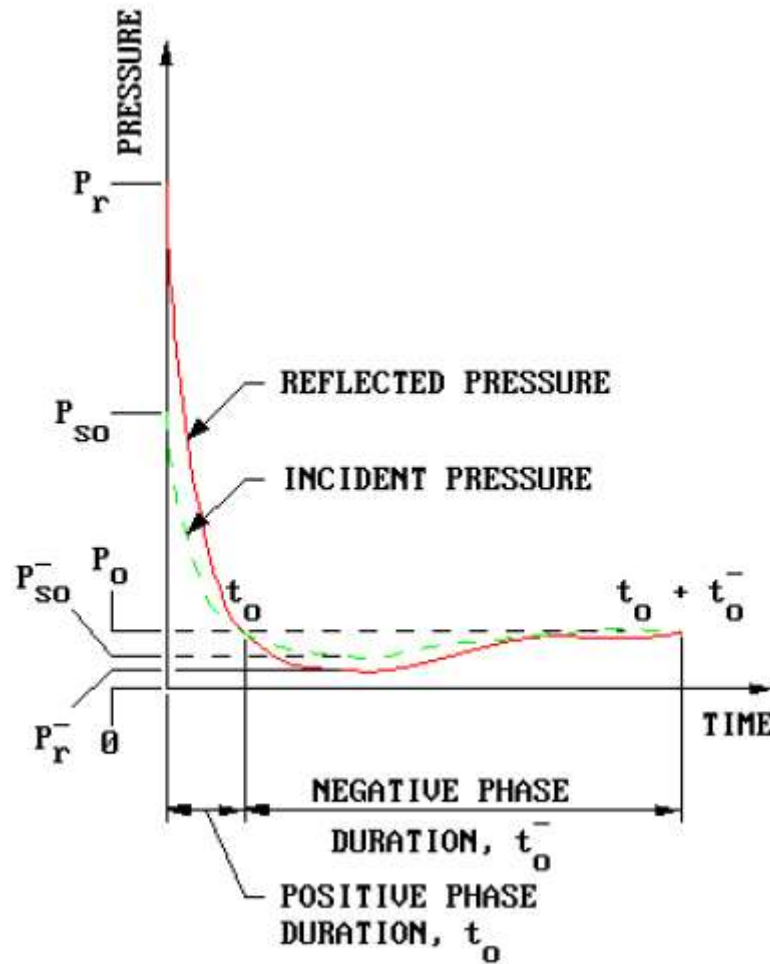
Quando uma onda de choque gerada pela detonação de um explosivo atinge uma superfície rígida, tal como a superfície do solo ou uma parede frontal, esta é refletida [3]. A Figura 2.17 apresenta a reflexão de uma onda de choque no solo para uma explosão acima deste.



**Figura 2.17** – Reflexão de uma onda de choque na superfície do solo para uma explosão ocorrendo a uma distância acima do solo [3].

A Figura 2.17 mostra quatro fases da progressão da onda de explosão. Na primeira fase e na segunda fase, a onda ainda não atingiu o solo, na terceira fase, uma onda de reflexão, indicada pela linha tracejada, é produzida.

A variação da pressão em relação ao tempo, para o ponto A da Figura 2.17 na superfície do solo é similar ao gráfico apresentado na Figura 2.18, onde  $P_r$  é a pressão refletida e os outros parâmetros são os mesmos para uma onda de choque gerada ao ar livre.



**Figura 2.18** – Variação da pressão incidente da pressão refletida com o tempo, numa posição fixa [3].

## Capítulo 3 Simulação numérica

Neste capítulo, discute-se o funcionamento do *software* utilizado, LS-DYNA, e as razões para a sua escolha. Serão também apresentados os fundamentos teóricos que estão por trás dos algoritmos utilizados pelo programa. Explicar-se-á a diferença entre os dois métodos tradicionais de fazer avançar a solução numérica no tempo: o método implícito e o método explícito. Utilizando o LS-DYNA o método explícito, o mesmo é explicado com mais ênfase. Finalmente explicam-se as abordagens Lagrangeana e Eulereana para a solução de problemas de elementos finitos, bem como o método Arbitrário Lagrangeano-Eulereano. Este último é explicado com maior detalhe, dado que se trata da metodologia utilizada nas simulações efetuadas no âmbito deste trabalho.

### 3.1 Descrição do LS-DYNA

O LS-DYNA é um hidrocódigo<sup>2</sup> desenvolvido pela empresa *Livermore Software Techonlogy Corporation* (LSTC) capaz de lidar com uma ampla gama de problemas dinâmicos e não lineares tais como, impacto, penetração e explosões ou ainda problemas envolvendo maquinaria de peças, fundição, moldagem bem como problemas complexos de interação fluido-sólido como o que sucede no interior dos vasos sanguíneos ou o coração humano [25]. A designação de hidrocódigo deriva do facto de quando do início do desenvolvimento de algoritmos para tratar de fenómenos (explosões nucleares por exemplo) envolvendo pressões muito elevadas, se ter considerado, para facilitar a análise, que os sólidos teriam um comportamento semelhante ao dos fluídos em que as tensões desviadoras são desprezáveis, face às elevadas pressões exercidas sobre aqueles [25].

O LS-DYNA utiliza três metodologias de elementos finitos para a análise de problemas dinâmicos não lineares: o método Lagrangiano, o Euleriano e o Arbitrário Lagrangiano-Euleriano (ALE). A diferença entre os três métodos reside essencialmente na forma como se processa o movimento relativo entre o movimento da malha de elementos finitos e o movimento do material em análise [15], [26].

---

<sup>2</sup> Hidrocódigo é uma designação antiga para os programas destinados à solução de problemas envolvendo elevadas pressões e largas deformações em estruturas ou problemas transientes de deformações finitas que ocorrem num curto período de tempo [31].

O LS-DYNA utiliza os dois métodos de integração direta no tempo (implícito e explícito) mas para problemas dinâmicos transientes não lineares tais como impactos e explosões é preferível utilizar a formulação explícita, que se baseia no método das diferenças finitas centrais de integração temporal sendo este o algoritmo utilizado na maioria das simulações dinâmicas efetuadas com o LS-DYNA [15], [27], [28].

### 3.1.1 Método das diferenças finitas centrais para integração temporal explícita

O método das diferenças finitas centrais é o método explícito mais popular na mecânica e física computacional [29]. É um método numérico utilizado para obter a aproximação da solução de uma equação diferencial às derivadas parciais por transformação dos termos diferenciais em diferenças finitas [30]. As equações de conservação de massa, momento e energia utilizadas para determinar as variáveis de estado (velocidade, massa específica, pressão e energia) são equações diferenciais às derivadas parciais. Para obter a solução destas equações, o método de diferenças centrais pode ser utilizada para aproximar as derivadas parciais a expressões algébricas [30]. Nesta tese, o método de diferenças centrais de integração temporal é demonstrada para as expressões do deslocamento e da velocidade.

Com o propósito de descrever o método de diferenças centrais de integração temporal considere a seguinte notação: o tempo de simulação,  $0 \leq t \leq t_E$ , é dividido em incrementos de tempo ou passos de tempo,  $\Delta t^n$ ,  $n = 1 \dots n_{TS}$ , onde  $n_{TS}$  é o número de passos de tempo e  $t_E$  é o tempo do fim da simulação. As variáveis, referentes a um dado passo de tempo, são afetadas por um índice referente a esse passo de tempo: assim,  $t^n$  e  $d^n \equiv d(t^n)$  são o tempo e o deslocamento, respetivamente, no passo de tempo  $n$ . Os incrementos de tempo são definidos pela expressão (3.1) [29].

$$\Delta t^{n+1/2} = t^{n+1} - t^n, \quad t^{n+1/2} = \frac{1}{2}(t^{n+1} + t^n), \quad \Delta t^n = t^{n+1/2} - t^{n-1/2} \quad (3.1)$$

O método das diferenças finitas centrais baseia-se na expressão da diferença central de segunda ordem obtida à partir da expansão das séries de Taylor [30], [31]:

$$f^n = f^{n+1/2} - \dot{f}^{n+1/2} \left( \frac{\Delta t^{n+1/2}}{2} \right) + \frac{1}{2} \ddot{f}^{n+1/2} \left( \frac{\Delta t^{n+1/2}}{2} \right)^2 \dots \quad (3.2)$$

$$f^{n+1} = f^{n+1/2} + \dot{f}^{n+1/2} \left( \frac{\Delta t^{n+1/2}}{2} \right) + \frac{1}{2} \ddot{f}^{n+1/2} \left( \frac{\Delta t^{n+1/2}}{2} \right)^2 \dots \quad (3.3)$$

Subtraindo a equação (3.3) da equação (3.2), obtém-se a expressão da diferença central de segunda ordem (equação (3.4)).

$$f^{n+1} = f^n + \dot{f}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} + O\left(\left(\Delta t^{n+1/2}\right)^3\right) \quad (3.4)$$

Aplicando este método às equações de movimento tem-se as expressões do deslocamento (equação (3.5)) e da velocidade (equação (3.6)):

$$d^{n+1} = d^n + v^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (3.5)$$

$$v^{n+1/2} = v^{n-1/2} + a^n \Delta t^n \quad (3.6)$$

Onde,  $d$  é o deslocamento,  $v$  é a velocidade e  $a$  é a aceleração.

### 3.1.2 Método explícito e método implícito

No âmbito de demonstrar os conceitos dos métodos explícito e implícito, considere a integração temporal da equação de movimento sem amortecimento, no passo de tempo  $n$  (expressão (3.7)) [29]:

$$Ma^n = F^n = F^{\text{ext}}(d^n, t^n) - F^{\text{int}}(d^n, t^n) \quad (3.7)$$

Sujeito às condições de fronteiras (3.8):

$$g_I(d^n) = 0, \quad I = 1 \text{ to } n_c \quad (3.8)$$

Onde:

- $M$  é a matriz de massa;
- $F^{\text{ext}}$  é o vetor das forças externas;
- $F^{\text{int}}$  é o vetor das forças internas;

A expressão (3.8) é a representação generalizada das condições de fronteiras do deslocamento  $n_c$ . A matriz de massa é considerada constante (não depende do tempo) e é diagonal. As forças, externa e interna são dependentes do tempo e dos deslocamentos nodais [29].



## Método explícito

Seja  $n-1/2$  o estado anterior,  $n$  o estado atual,  $n+1$  e  $n+1/2$  os estados posteriores. No método explícito, para avançar a solução numérica no tempo, o deslocamento e a velocidade são determinadas como se segue: substituindo a expressão (3.7) na expressão (3.6) obtém-se a velocidade no tempo  $n+1/2$  (expressão (3.9)); o deslocamento no tempo  $n+1$  é determinado recorrendo a expressão (3.5).

$$v^{n+1/2} = v^{n-1/2} + \Delta t^n M^{-1} F^n \quad (3.9)$$

Como se pode observar nas equações (3.5) e (3.9) (equações s do deslocamento e da velocidade, respetivamente), todos os termos dos lados direitos das mesmas são conhecidos, pois foram calculados nos tempos anteriores, logo, para avançar a solução no tempo, é necessário apenas informação previamente calculada. No processo de fazer avançar a solução no tempo, utilizando o método explícito, não é necessário resolver quaisquer sistemas de equações, dado que a matriz de massas  $M$  é diagonal. Esta é a característica de um método explícito [29].

Contudo existe um problema. Os métodos explícitos são condicionalmente estáveis. Especificando, o intervalo de tempo  $\Delta t$  não deve ultrapassar um determinado valor crítico. Este valor crítico do incremento de tempo  $\Delta t$  é estabelecido pela condição de Courant e pode ser expresso em termos da frequência natural do elemento (expressão (3.10) para sistemas amortecidos e expressão (3.11) para sistemas não amortecidos, respetivamente), ou corresponder ao tempo necessário para que um elemento da malha seja atravessado por uma onda elástica viajando à velocidade do som no material. Este limite é pois função tanto da geometria do elemento como da velocidade do som no material do elemento [27], [29], [31].

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega} \left( \sqrt{1 + \zeta^2} - \zeta \right) \quad (3.10)$$

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega} \quad (3.11)$$

$\zeta$  - Coeficiente de amortecimento;

$\omega$  - Frequência natural.

## Método implícito

Considere-se a equação de movimento escrita no tempo  $n+1$  (expressão (3.12)) [29]:

$$Ma^{n+1} = F^{n+1} = F^{\text{ext}}(d^{n+1}, t^{n+1}) - F^{\text{int}}(d^{n+1}, t^{n+1}) \quad (3.12)$$

Para integrar a equação do movimento, considere-se o método  $\beta$  de Newmark [29] de integração temporal. Neste método, o deslocamento e a velocidade são dadas pelas expressões (3.13) e (3.14), respetivamente:

$$d^{n+1} = \tilde{d}^{n+1} + \beta \Delta t^2 a^{n+1} \quad \text{onde} \quad \tilde{d}^{n+1} = d^n + \Delta t v^n + \frac{\Delta t^2}{2} (1 - 2\beta) a^n \quad (3.13)$$

$$v^{n+1} = \tilde{v}^{n+1} + \gamma \Delta t a^{n+1} \quad \text{onde} \quad \tilde{v}^{n+1} = v^n + (1 - \gamma) \Delta t a^n \quad (3.14)$$

Onde,  $\Delta t = t^{n+1} - t^n$ , as variáveis  $\beta$  e  $\gamma$  são os parâmetros da integração e estão sumarizados na Tabela 3.1. As variáveis  $\tilde{d}^{n+1}$  e  $\tilde{v}^{n+1}$  são os valores calculados no tempo  $n$ , ou seja, informação já calculada.

Os dois parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  determinam o tipo de integração, para  $\beta > 0$  a integração é implícita e é incondicionalmente estável. Para  $\beta = 0$  a integração é explícita e é condicionalmente estável.

A fim de demonstrar o conceito de integração implícita, a equação (3.13) pode ser resolvida para avançar a aceleração no tempo  $n+1$ , considerando  $\beta > 0$ :

$$a^{n+1} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} (d^{n+1} - \tilde{d}^{n+1}) \quad (3.15)$$

Substituindo a equação (3.15) na equação do movimento (3.12) obtém-se uma equação algébrica não linear do deslocamento no tempo  $n+1$  (3.16):

$$\frac{1}{\beta \Delta t^2} M (d^{n+1} - \tilde{d}^n) = F^{\text{ext}}(d^{n+1}, t^{n+1}) - F^{\text{int}}(d^{n+1}, t^{n+1}) \quad (3.16)$$

**Tabela 3.1** – Parâmetros de integração do método  $\beta$  de Newmark [29].

<b>Newmark <math>\beta</math>-method</b>	
$\beta = 0, \gamma = \frac{1}{2}$	$\rightarrow$ Explicit central difference method
$\beta = \frac{1}{4}, \gamma = \frac{1}{2}$	$\rightarrow$ Undamped trapezoidal rule
$\gamma > \frac{1}{2}$	$\rightarrow$ Numerically damped integrator with damping proportional to $\gamma - \frac{1}{2}$
<i>Stability</i>	
Unconditionally stable for $\beta \geq \frac{\gamma}{2} \geq \frac{1}{4}$	
Conditional stability: $\omega_{\max} \Delta t = \frac{\xi \bar{\gamma} + \left[ \bar{\gamma} + \frac{1}{4} - \beta + \xi^2 \bar{\gamma}^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left( \frac{\gamma}{2} - \beta \right)}, \quad \bar{\gamma} \equiv \gamma - \frac{1}{2} \geq 0$	
$\xi \rightarrow$ Fraction of critical damping in frequency $\omega_{\max}$	

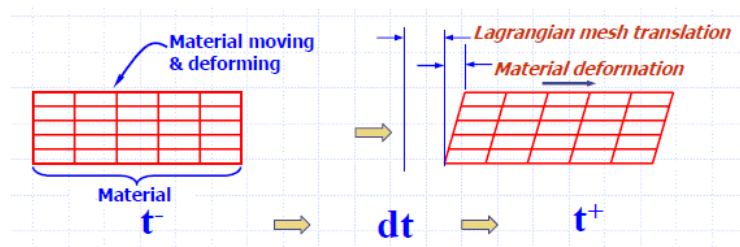
Como se pode observar na equação (3.16) o cálculo do deslocamento ( $d$ ) no tempo  $n+1$  requer o conhecimento dos termos do lado direito da equação no tempo  $n+1$ , que obviamente não são conhecidos. Este facto requer a solução de um sistema de equações, o que torna este método bem mais complexo do que no caso da integração explícita. Belytschko [29] descreve o método de Newton que é um dos métodos mais utilizados para resolver o sistema de equações da equação (3.16).

Os métodos implícitos, ao contrário dos métodos explícitos, são incondicionalmente estáveis e permitem obter intervalos de tempo maiores [25], [29]. No entanto, num problema dinâmico com grandes deformações, em que o intervalo de tempo utilizado é muito pequeno, o tempo de computação numa interação implícita seria impraticavelmente longo. Pode-se dizer que os métodos implícitos são adequados para análise dinâmica de estruturas, enquanto os métodos explícitos são adequados para analisar problemas envolvendo grandes deformações, como por exemplo explosões e impactos a altas velocidades [13], [15], [25].

### 3.1.3 Método Lagrangiano

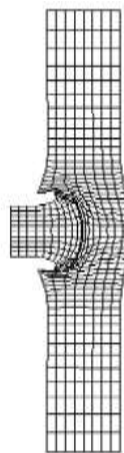
Numa formulação de elementos finitos várias considerações podem colocar-se quanto ao movimento da malha e do material. Vejamos a abordagem Lagrangiana.

No método Lagrangiano, o domínio do material é representado por uma malha computacional, em que os pontos do material estão ligados aos nós da malha computacional e a malha move-se e deforma-se juntamente com o material como se pode ver na Figura 3.1. Esta é considerada a abordagem mais exata e a de formulação mais fácil. A malha coincide com o material e acompanha o seu movimento. Vantagens como a precisão na definição de interfaces entre materiais e superfícies livres de materiais e a capacidade de incorporar modelos complexos de materiais fazem com que este método seja muito utilizado na análise de deformações estruturais [29], [31]–[34].



**Figura 3.1** – Representação da formulação Lagrangiana [35].

O método Lagrangiano tem limitações na análise de problemas envolvendo grandes deformações tais como as apresentadas na Figura 3.2. Grandes deformações conduzem a imprecisões e requerem a utilização de incrementos de tempo muito pequenos que tornam a simulação muito demorada ou mesmo inviável [25], [34], [36].

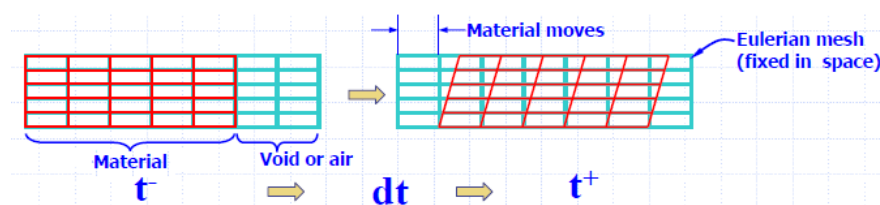


**Figura 3.2** – Malha largamente deformada devido ao impacto de um projétil [12].

Um reconstrução manual da malha (*manual rezoning*) é uma técnica que pode ser utilizando para controlar a deformação da malha em ordem a prosseguir com a simulação sempre que a malha sofrer grandes deformações [26], [32], [36]. A reconstrução manual é difícil e morosa e tende a produzir resultados diferentes consoante a perícia de quem executa esta operação [36]. O método Lagrangiano não é adequado para simular problemas de explosões devido às grandes deformações causadas pela onda de choque gerada na explosão [26], [34].

### 3.1.4 Método Euleriano

O método Euleriano assume que a malha computacional é fixa no espaço e que o material flui através da malha. Hipoteticamente este método considera duas malhas sobrepostas como se pode ver na Figura 3.3: a malha de referência, que é fixa no espaço e a malha do domínio do material, que flui através da malha de referência. Este método é geralmente usado na dinâmica de fluidos, onde são comuns grandes deformações [29], [31]–[34].



**Figura 3.3** – Representação da formulação Euleriano [35].

A sua vantagem reside no facto de a malha não se deformar o que obvia aos riscos de *crash* quando o esmagamento dos elementos conduz a intervalos de tempo tendencialmente nulos. Contudo, o facto de o material fluir através da malha introduz a necessidade de complexos algoritmos de transporte de material entre elementos, a definição das interfaces torna-se mais difícil, bem como das fronteiras e dos fenómenos de contacto, sendo todos estes fatores fontes de imprecisão nos resultados [32], [33].

### 3.1.5 Método ALE

No método ALE, a malha computacional move-se de forma arbitrária e independente do material. O método considera duas malhas: uma é a malha computacional, que constitui a malha de referência, que se move arbitrariamente e a outra é a malha que representa o domínio do material (Figura 3.4). A malha do material flui através da malha de referência. A vantagem deste método é que ao fazer mover a malha computacional se pode minimizar o efeito do transporte de material entre elementos e assim, aumentar a precisão dos resultados [29], [31]–[34].

O método ALE combina as vantagens dos métodos Lagrangiano e Euleriano e cada um destes pode ser visto como um caso particular do método ALE [32].

As equações dos balanços (massa, momento e energia) podem ser integradas usando técnicas que admitem a coexistência de vários materiais no mesmo elemento o que torna o método adequado para a análise de explosões, em que, em cada elemento poderão estar contidos mais do que um material, o ar e os produtos da reação do explosivo produzidos na sua detonação [37].

O ALE pode ser usado tanto na análise dinâmica de fluidos como na análise dinâmica de estruturas, bem como em inúmeros campos da engenharia, da física e da medicina [25], [26], [32].

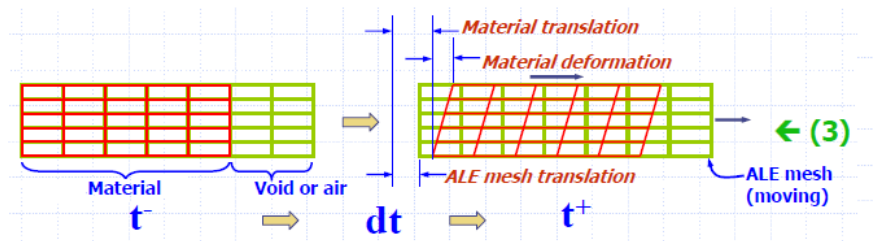


Figura 3.4 – Representação da formulação ALE [35].

### 3.1.5.1 Descrição das leis de conservação no método ALE

O método ALE baseia-se, portanto, no movimento arbitrário de um domínio de referência que corresponde à malha de elementos finitos. O domínio ALE é introduzido como um terceiro domínio, em relação aos domínios material e espacial [37]. Como se disse, os métodos Lagrangiano e Euleriano correspondem a casos particulares do método ALE. Se o domínio de referência coincidir com o domínio espacial estaremos perante uma análise Eulereana. Se coincidir com a malha do material então teremos uma análise Lagrangiana [32].

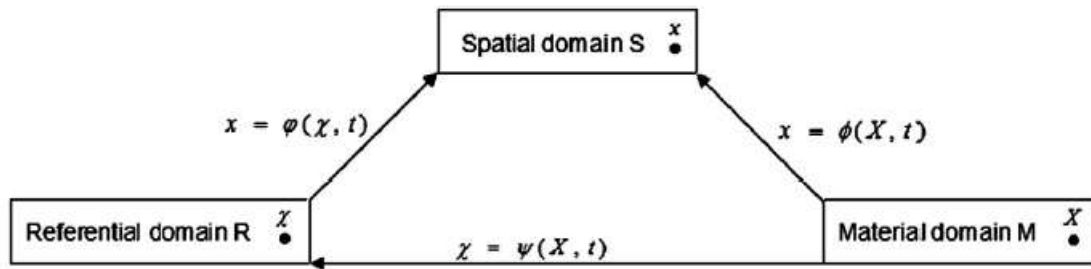
Em ordem a descrever as expressões de conservação de massa, momento e energia de acordo com a metodologia ALE, consideram-se os três sistemas de coordenadas, espacial, material e de referência:

- A coordenada espacial correspondente ao domínio Euleriano (domínio S) é representada pela variável  $x$  ;
- A coordenada material correspondente ao domínio Lagrangiano (domínio M) é representada pela variável  $X$  .

- A coordenada da malha correspondente ao domínio ALE (domínio R) é representada pela variável  $\chi$ .

Esta descrição baseia-se nos trabalhos de Alia [37] e Mahmedi [34] e no manual de teoria do LS-DYNA [27].

Considere-se a Figura 3.5 onde estão representadas os três domínios, material, espacial e de referência. Um mapeamento entre o domínio do material e o domínio espacial define o movimento do material,  $\vec{\phi}$ . O movimento da malha é definido pelo mapeamento entre o domínio de referência e o domínio espacial  $\vec{\varphi}$ . Um último mapeamento entre o domínio do material e o domínio de referência denominado pela variável  $\vec{\psi}$  define o movimento do material no sistema de coordenadas de referência (ALE).



**Figura 3.5** – Representação dos mapeamentos entre os domínios de material, espacial e de referência [34].

As velocidades do material, da malha e do material no sistema de coordenada referencial são definidas pelas derivadas parciais em ordem ao tempo, dos mapeamentos  $\vec{\phi}$ ,  $\vec{\varphi}$  e  $\vec{\psi}$  nas expressões (3.17), (3.18) e (3.19), respetivamente.

$$\frac{\partial \vec{\phi}}{\partial t} = v \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial \vec{\varphi}}{\partial t} = v_{mesh} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \vec{\psi}}{\partial t} = \vec{w} \quad (3.19)$$

A derivada em ordem ao tempo de uma variável  $f$  em relação ao sistema de coordenadas de referência  $\chi$  é expressa pela equação (3.20):

$$\frac{df(\vec{X}, t)}{dt} = \frac{\partial f(\vec{\chi}, t)}{\partial t} + (\vec{v} - \vec{v}_{mesh}) \cdot \overrightarrow{grad} f(\vec{\chi}, t) \quad (3.20)$$

As equações da conservação da massa, momento e energia para um fluido Newtoniano no método ALE em função da coordenada de referência são expressas pelas equações (3.21), (3.22) e (3.23) respetivamente.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \text{div}(\vec{v}) + (\vec{v} - \vec{v}_{mesh}) \cdot \overrightarrow{grad}(\rho) = 0 \quad (3.21)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} - \vec{v}_{mesh}) \cdot \overrightarrow{grad}(\vec{v}) = \overrightarrow{div}(\overline{\overline{\sigma}}) + \vec{f} \quad (3.22)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho (\vec{v} - \vec{v}_{mesh}) \cdot \overrightarrow{grad}(e) = \overline{\overline{\sigma}} : \overrightarrow{grad}(\vec{v}) \quad (3.23)$$

Onde,  $\rho$  é massa específica,  $\sigma$  é a tensão total de Cauchy, definida pela equação (3.24).

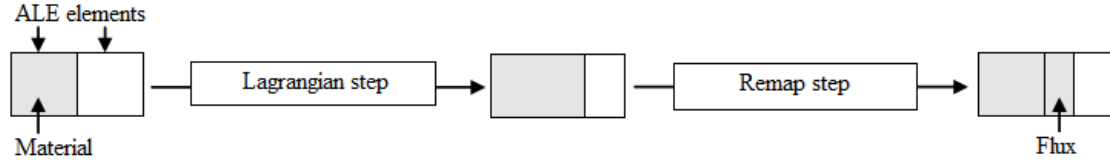
$$\overline{\overline{\sigma}} = -p \cdot \overline{id} + \mu \left( \overrightarrow{grad}(\vec{v}) + \overrightarrow{grad}(\vec{v})^T \right) \quad (3.24)$$

Em que  $p$  é a pressão,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica e  $\overline{id}$  é a função delta Kronecker. As equações (3.21) – (3.23) são completadas por uma equação de estado que relaciona pressão, massa específica e energia por forma a se poderem determinar as variáveis de estado (velocidade, massa específica, pressão e energia) [37].

O método ALE implementado no LS-DYNA utiliza a técnica chamada de *operator split* para resolver as equações de Navier-Stokes (3.21) – (3.23) [26], [34], [37]. A mesma técnica é utilizada para o método Euleriano [16].

O método do *operator split* divide o cálculo de cada passo da computação em duas fases: a primeira consiste numa fase Lagrangiano (*Lagrangian step*) e a segunda numa fase de remapeamento (*remap step*) ou fase Euleriana como se ilustra na Figura 3.6 [26], [34], [37].





**Figura 3.6** – Fase Lagrangiano e fase de remapeamento no método do operador split [34].

#### 3.1.5.1.1 Fase Lagrangiana

Na primeira fase (fase Lagrangiana), a velocidade da malha é igual a velocidade do material ( $v = v_{mesh}$ ), a malha deforma-se juntamente com o material. Para evitar grandes deformações na malha, suscetíveis de fazer reduzir o intervalo de tempo e aumentar o tempo de computação, é necessário fazer um remapeamento (uma reconstrução automática) logo é necessário uma outra fase para continuar a simulação: a fase de remapeamento [34].

Na fase Lagrangiana são resolvidas as equações (3.25) – (3.27), que correspondem às formas conservativas dos balanços de momento, energia e massa, respetivamente.

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \overrightarrow{div}(\overline{\overline{\sigma}}) + \vec{f} \quad (3.25)$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \overline{\overline{\sigma}} : \overline{\overline{grad}}(\vec{v}) + \vec{f} \cdot \vec{v} \quad (3.26)$$

$$\rho J = \rho_0 \quad (3.27)$$

Onde,  $\rho_0$  é a massa específica inicial e  $J$  é deformação volumétrica definida pelo Jacobian,

$$J = \det \left( \frac{\partial \chi_i}{\partial X_j} \right).$$

As equações de equilíbrio (3.25) e (3.26) são resolvidas pelo método de diferenças finitas, enquanto a equação de conservação massa na fase Lagrangiana é resolvida na sua forma integral, de forma direta.

O limite do incremento de tempo é definido pela condição de estabilidade de Courant que impõe um valor máximo para o incrementos de tempo  $\Delta t$  a usar na simulação (expressão (3.28)). Os incrementos de tempo são obtidos dividindo o comprimento característico de um elemento,  $l_e$  por uma velocidade de onda que é função da velocidade do som,  $c_e$  e  $Q_e$  que é definida pela expressão (3.29).

$$\Delta t \leq \min_e \left( \frac{l_e}{Q_e + \sqrt{Q_e^2 + c_e^2}} \right) \quad (3.28)$$

$$Q_e = C_1 \cdot c + C_2 \cdot |\text{div}(\vec{v})| l_e. \quad (3.29)$$

Onde,  $C_1$  e  $C_2$  são constantes adimensionais (assumem valores padrão de 0.06 e 1.5, respetivamente) e  $c$  é a velocidade do som no material contido dentro do elemento e é definido pela expressão (3.30).

$$c^2 = \frac{\frac{4}{3}G + k}{\rho_0} \quad (3.30)$$

$$k = \rho_0 \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} + \frac{p}{\rho^2} \frac{\partial p}{\partial e} \right) \quad (3.31)$$

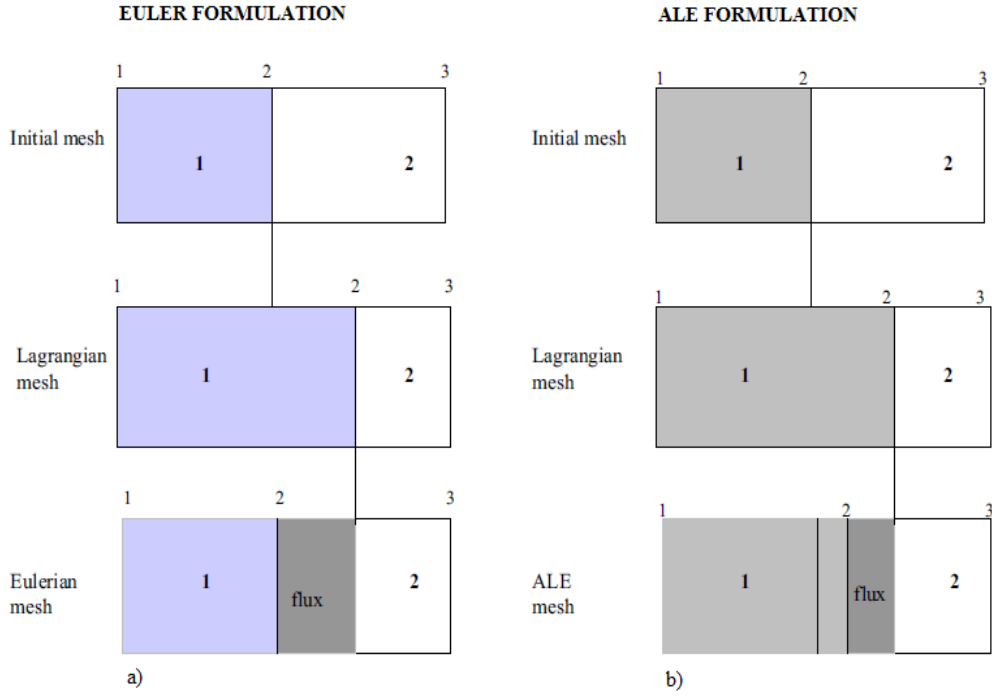
$G$  é o módulo de rigidez. Para explosivos o módulo de rigidez não é considerado [27], [34].

#### 3.1.5.1.2 Fase do remapeamento

A fase de remapeamento divide-se em duas subfases: a fase de *rezoning* e a fase de advecção (transporte)

- **Subfase de *rezoning***

Nesta subfase, o método ALE utiliza um algoritmo denominado de *Smoothing algorithm* para reduzir as distorções sofridas pela malha na fase Lagrangiana [36]. No método Euleriano, como a malha de referência é fixa no espaço ( $v_{mesh} = 0$ ), não existe esta subfase. No método ALE, os nós da malha são movidos para uma posição arbitrária definida pelo algoritmo [26]. Na Figura 3.7, ilustra-se a diferença entre o método Euleriano e o método ALE.



**Figura 3.7** – Diferença entre o método Euleriano e o método ALE: a) método Euleriano b) método ALE [26].

O LS-DYNA utiliza um algoritmo denominado *Equipotencial algorithm* para controlar a deformação da malha [27].

- **Subfase de advecção**

Como se ilustra na Figura 3.6, na fase Lagrangiana o material e a malha movem-se juntos, e após a fase Lagrangiana o material permanece na mesma posição, na subfase de *rezoning* a malha é movida para trás para uma posição otimizada. A fase de advecção consiste no transporte de massa, momento e energia entre as fronteiras dos elementos. A equação de transporte para a fase de advecção é expressa pela equação (3.32).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{a} \cdot \overrightarrow{grad}(\alpha) &= 0 \\ \alpha(\vec{\chi}, 0) &= \alpha_0(\chi) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Onde,  $\vec{a} = \vec{v} - \vec{v}_{mesh}$  é a diferença entre a velocidade do material e a velocidade da malha. A equação (3.32) é resolvida sucessivamente para as variáveis conservativas: massa, momento e energia com a condição inicial  $\alpha_0(\chi)$ , que é a solução do cálculo Lagrangiano das equações (3.25) e (3.26). O sistema de equação hiperbólica (3.32) é resolvido para massa, momento e energia utilizando um método de volumes finitos (métodos de advecção).

### 3.1.6 Métodos de advecção

O LS-DYNA utiliza, principalmente, dois algoritmos de advecção no transporte do fluxo de material entre elementos: O método de advecção de Donor Cell e o método de advecção de Van Leer [27], [38]. Estes dois métodos estão descritos em Benson [31]. Ambos os métodos são estáveis, monotónicos e conservativos e ambos são métodos *upwind*<sup>3</sup> [31], [39]–[41].

**Monotónico** – Um algoritmo de advecção é monotónico, quando não introduz valores máximos ou mínimos na solução das variáveis, durante a fase de advecção [31], [39], [40].

**Conservativo** – Um algoritmo de advecção é conservativo se propriedades como a massa e o momento forem conservados durante a fase de advecção [39], [40].

#### Método de advecção de Donor Cell

O método de Donor Cell é um método de primeira ordem que é estável, monotónico e conservativo, mas também é muito dissipativo [31], [39], [40]. O algoritmo de Donor Cell assume que a distribuição de uma variável,  $\phi$ , num elemento é constante e a equação de transporte em 1D para uma quantidade  $\phi$  é expressa pela equação (3.33) [39], [40].

$$\phi_{j+1/2}^{n+1} = \phi_{j+1/2}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_j^\phi - f_{j+1}^\phi) \quad (3.33)$$

$$f_j^\phi = \frac{a_j}{2} (\phi_{j-1/2}^n + \phi_{j+1/2}^n) + \frac{|a_j|}{2} (\phi_{j-1/2}^n - \phi_{j+1/2}^n) \quad (3.34)$$

O valor inicial da variável  $\phi$  à esquerda e à direita do nó  $j$  são:  $\phi_{j-1/2}^n$  e  $\phi_{j+1/2}^n$ , respetivamente.

A variável  $a_j$  é a velocidade convectiva no nó  $j$ . Se a velocidade convectiva,  $a_j$ , for positiva, então o fluxo,  $f_j^\phi$ , toma informação de  $\phi_{j-1/2}^n$  e se for negativa o fluxo toma informação de  $\phi_{j+1/2}^n$ , evidenciando assim o método *upwind*.

---

<sup>3</sup> Métodos *upwind* – Os métodos *upwind* são utilizados para discretizar as equações diferenciais parciais hiperbólicas usando a diferenciação. Considere a equação de advecção em uma dimensão [31], que descreve a propagação de uma onda ao longo do eixo  $x$  com uma velocidade  $a$ :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + a(x) \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

Considere um ponto de uma malha,  $i$ , em 1D. No domínio unidimensional existem apenas duas direções associadas ao ponto  $i$ : direita e esquerda. Se  $a$  for positivo, o lado esquerdo é chamado de lado *upwind* e o lado direito de lado *downwind*. De modo similar, se  $a$  for negativo, o lado direito é chamado de lado *upwind* e o esquerdo de lado *downwind*.

### Método de advecção de Van Leer

O método de advecção de Van Leer é um método de segunda ordem que, também é monotónico, estável e conservativo, mas requer maior tempo computacional que o método de Donor Cell [39], [40]. O algoritmo de Van Leer substitui a distribuição constante da variável  $\phi$  por uma variação linear num elemento. Isto é conseguido pela introdução de uma função linear,  $\phi_L$ . O declive,  $S$ , dessa função linear num elemento em 1D pode ser calculada utilizando o método de diferenças centrais (equação (3.35)) onde,  $i$  indica o elemento:

$$S_i = \frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{L} \quad (3.35)$$

Utilizar apenas a diferença central para calcular o declive num elemento, pode introduzir mínimos e máximos, como se pode ver na Figura 3.8 e por isso é necessário outra formulação para garantir que o método seja monotónico. Nesta nova formulação, o máximo declive permitido à direita e à esquerda de um elemento são calculados.

Na figura 3.10 pode-se ver como podem os declives ser definidos, juntamente com o declive das diferenças centrais. Os máximos declives à esquerda ( $s_i^L$ ) e à direita ( $s_i^R$ ) podem ser expressas pelas equações (3.36) e (3.37).

$$s_i^L = \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{L_-} \quad (3.36)$$

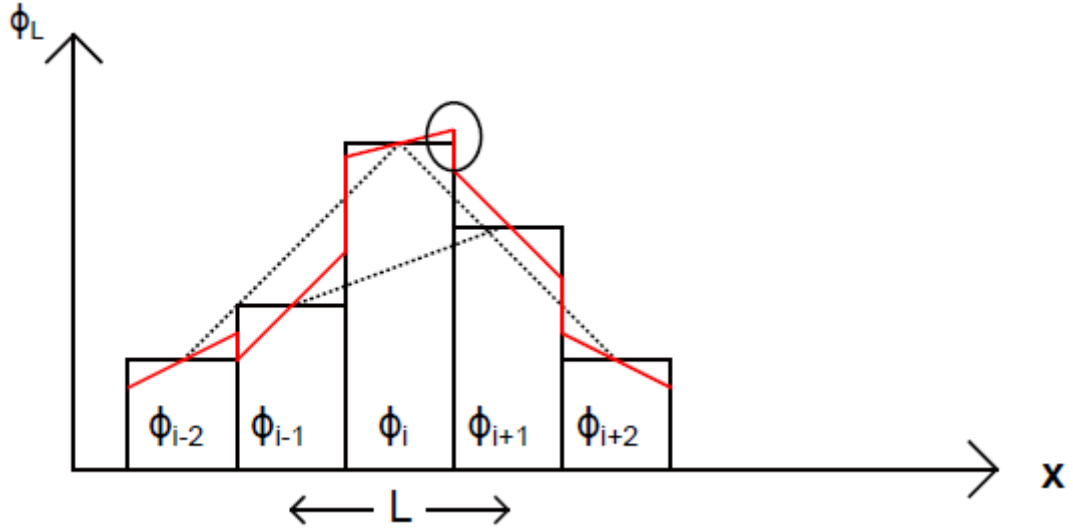
$$s_i^R = \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{L_+} \quad (3.37)$$

Definidos os máximos declives num elemento, a função linear com comportamento monotónico é definido pela expressão (3.38).

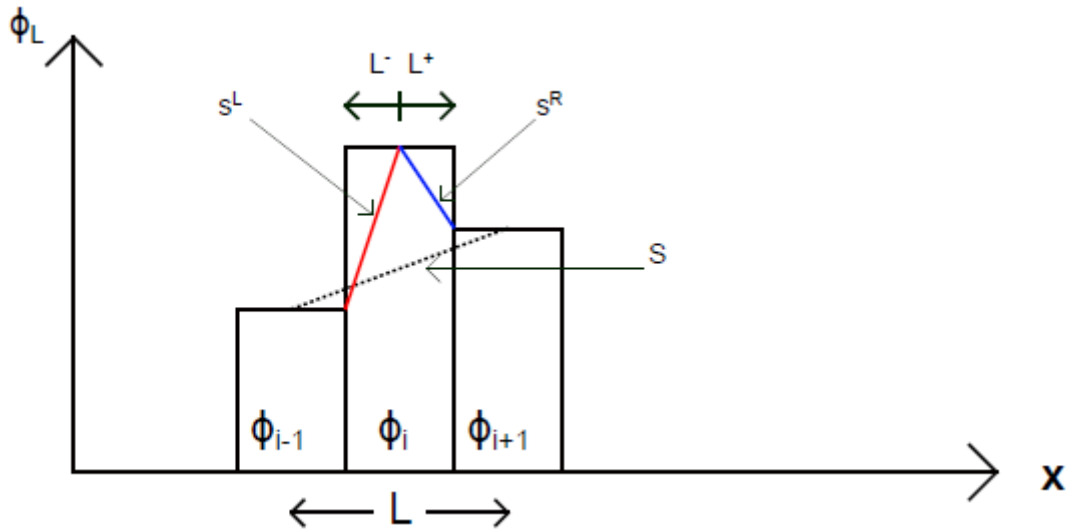
$$\frac{\partial \phi_L}{\partial x} = \frac{1}{2} \left( \text{sgn}(s^L) + \text{sgn}(s^R) \right) \min(|s^L|, |s^R|, |S|) \quad (3.38)$$

Onde a função  $\text{sgn}$  é definida como:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & \text{se } x < 0 \\ 0 & \text{se } x = 0 \\ 1 & \text{se } x > 0 \end{cases} \quad (3.39)$$



**Figura 3.8** – A variação linear da variável  $\phi_L$  é descrita pela linha vermelha e alinhada tracejada define o declive de  $\phi_L$  sobre um elemento utilizando o método de diferenças centrais. O círculo indica que um novo valor máximo é introduzido na posição do círculo [39].



**Figura 3.9** – Exemplo de como são definidos os máximos declives, à esquerda (linha vermelha),  $s^L$  e à direita (linha azul),  $s^R$  e o declive  $S$  das diferenças centrais para um elemento  $\phi_i$  [39]



## Capítulo 4 Simulação numérica no LS-DYNA

Neste capítulo descrevem-se as ferramentas computacionais utilizadas na presente tese. Posteriormente descrevem-se os modelos constitutivos e as equações de estado para o ar e para os explosivos utilizados neste trabalho. Procura-se ainda descrever algumas técnicas numéricas implementadas no LS-DYNA que se considerou serem relevantes na simulação da detonação de um explosivo.

### 4.1 Ferramentas computacionais utilizadas nesta tese

Nesta tese, todo o pré-processamento, relacionado com as modelações das explosões, foi realizado no LS-PrePost, que é uma ferramenta que foi projetada especificamente para o LS-DYNA. Os cálculos numéricos foram realizados utilizando o *solver* LS-DYNA da ANSYS® 12.1. Após efetuada a modelação do problema no LS-PrePost é gerado um ficheiro de entrada *.k* que é lido pelo *solver* LS-DYNA Solver.

As malhas de elementos finitos, utilizadas nesta tese, foram geradas no programa de elementos finitos ANSYS e no pré e pós-processador, LS-PrePost. A geração de malhas através do ANSYS foi conseguida através de ficheiros em linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language). O ANSYS lê as instruções contidas no APDL, e gera um ficheiro *.txt* que contém a malha de elementos finitos. O LS-PrePost trabalha com ficheiros de entrada de formato *.k*, pelo que para converter os ficheiros *.txt* das malhas geradas no ANSYS para ficheiros de entrada *.k* do LS-PrePost, foi utilizado o *software*, MATLAB. No ANEXO-A está descrito o programa gerado no MATLAB para converter os ficheiros *.txt* das malhas geradas no ANSYS para ficheiros de entrada *.k* do LS-PrePost.

Todas as simulações numéricas realizadas nesta tese foram efetuadas em dois computadores, ambos com processadores Intel(R) Core(TM) 3820 3.60 GHz, com 32 GB de memória RAM e 8 CPUs (Unidade Central de Processamento).



## **4.2 INITIAL\_VOLUME\_FACTION\_GEOMETRY**

O LS-DYNA permite dividir a malha de elementos finitos em partes (\*PART) em que a cada uma corresponde, basicamente, um material, um tipo de elemento e uma equação de estado. Isto significa que a modelação de uma explosão requer, no mínimo a modelação de duas partes, uma para o explosivo e outra para a massa de ar envolvente, na qual se irá propagar a onda de choque.

Contudo a modelação destas duas partes pode ser morosa pois implica a criação de duas malhas, corretamente conectadas na fronteira comum o que nem sempre é fácil de conseguir. A forma de ultrapassar esta dificuldade consiste na utilização de uma função do LS-DYNA que permite atribuir a uma zona de uma determinada malha um \*PART diferente. Ou seja, pode-se, no domínio que se modela a massa de ar, criar uma zona e defini-la como sendo o alto-explosivo.

A opção \*INITIAL\_VOLUME\_FRACTION\_GEOMETRY do LS-DYNA permite, portanto, a inicialização de diferentes materiais numa única malha de um modelo multi-material ALE [26], [42]. Isto é conseguido através de um método de fração de volume, onde, formas geométricas específicas, nomeadamente, cilindros, retângulos e planos ou partes de uma malha são definidos numa determinada malha e quer o interior ou exterior das referidas formas irão definir um novo \*PART a ser preenchido com um material especificado. Ou seja, a zona definida pela dita forma geométrica passa a ser tratada como se tivesse sido modelada com uma malha própria. [26].

## **4.3 Modelos constitutivos e equações de estado**

Para modelar a detonação de altos explosivos no LS-DYNA é ainda necessário definir equações de estado para o explosivo e para o meio onde o explosivo é detonado (exemplo: ar ou água), bem como as características do material do explosivo e do meio circundante.

### **4.3.1 Equações de estado (EOS) e modelo constitutivo do explosivo**

O estado dos produtos gerados na detonação é descrito por vários tipos de EOS [37]. Nesta tese, a EOS de Jones-Wilkins-Lee (JWL) foi adotado graças à sua simplicidade e devido ao facto de a maioria dos altos explosivos serem modelados por esta equação de estado [37].

A equação de estado de JWL é expressa pela expressão (4.1), onde  $p_{EOS}$  é a pressão dos produtos da reação,  $V = \frac{\rho_0}{\rho}$  é o volume relativo ou a relação entre a massa específica inicial do material sólido do explosivo e a massa específica atual,  $E$  é a energia interna por unidade de volume,  $A, B, R_1, R_2$  e  $\omega$  são constantes respeitantes ao explosivo [1], [37], [43].

$$p_{EOS} = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{(-R_1 V)} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{(-R_2 V)} + \frac{\omega}{V} E \quad (4.1)$$

O modelo \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN do LS-DYNA juntamente com a equação de estado permite modelar a detonação do explosivo [44].

O modelo \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN utiliza uma função,  $F$ , denominada de *burn fraction*, que controla a libertação da energia química para simular a detonação do explosivo. A frente da onda de choque move-se à velocidade de detonação e vai detonando os elementos da malha do explosivo que vão sendo alcançados por ela. A pressão no interior de cada elemento é fornecida pela equação JWL, o material expande e é transportado para os elementos adjacentes até á combustão completa do explosivo. O processo pode ser controlado através dessa função  $F$  [27].

A expressão padrão do *burn fraction* no LS-DYNA é dada pela expressão (4.2) [12], [44]–[46].

$$F = \max (F_1, F_2) \quad (4.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1(2D) = \begin{cases} \frac{2(t-t_d)DL_{e\max}}{3A_e} & \text{se } t > t_d \\ 0 & \text{se } t \leq t_d \end{cases} \text{ e } F_1(3D) = \begin{cases} \frac{2(t-t_d)DA_{e\max}}{3v_e} & \text{se } t > t_d \\ 0 & \text{se } t \leq t_d \end{cases} \\ F_2 = \frac{1-V}{1-V_{CJ}} \end{array} \right. \quad (4.3)$$

$$t_d = t_l - \frac{L_d}{D} \quad (4.4)$$

$$V_{CJ} = \frac{1-P_{CJ}}{\rho_0 D^2} \quad (4.5)$$

Onde,  $D$  é a velocidade de detonação,  $t_d$  é o tempo de ignição de um elemento,  $t_i$  é o tempo de iluminação de um elemento,  $t$  é o tempo atual,  $L_d$  é a distância do centro de um elemento ao ponto de ignição (ponto de ignição do explosivo),  $L_{\text{max}}$  é o maior comprimento de um elemento 2D,  $A_e$  é a área de um elemento 2D,  $A_{\text{max}}$  é a área da maior secção de um elemento 3D,  $v_e$  é o volume de um elemento 3D,  $V$  é o volume relativo,  $V_{CJ}$  é o volume relativo de Chapman-Jouguet,  $P_{CJ}$  é a pressão de Chapman-Jouguet e  $\rho_0$  é a massa específica do material sólido do explosivo. A expressão de  $F_1(2D)$  é utilizado para cálculos em 2D e  $F_1(3D)$  é utilizado para cálculos em 3D.

A pressão efetiva num elemento à qualquer instante de tempo é, portanto dada pela expressão (4.6) em que a pressão obtida pela EOS é multiplicada pelo fator  $F$ .

$$p = p_{EOS} \times \min(1, F) \quad (4.6)$$

Deste modo a pressão no elemento vai variando à medida que o fator  $F$  é incrementado permitindo “distribuir” a onda de detonação por vários elementos. O processo necessita de vários intervalos de tempo até  $F$  atingir a unidade, e o elemento se considerar completamente detonado [27].

#### 4.3.2 Equação de estado e modelo constitutivo do ar

A EOS do ar baseia-se na lei dos gases perfeitos [37]. A equação de gás perfeito (expressão (4.8)) é obtida com base numa equação polinomial linear descrita pela expressão (4.7) [37].

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + E(C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2) \quad (4.7)$$

Para um gás perfeito, a equação pode ser reduzida utilizando coeficientes apropriados ( $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$ ,  $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ ):

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (4.8)$$

Onde,  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ ,  $\rho_0$  e  $\rho_1$  são as massas específicas, inicial e atual do ar, respetivamente,  $E$  é a energia específica interna e  $\gamma$  é a relação politrópica de calores específicos, que tem o valor 1.4.

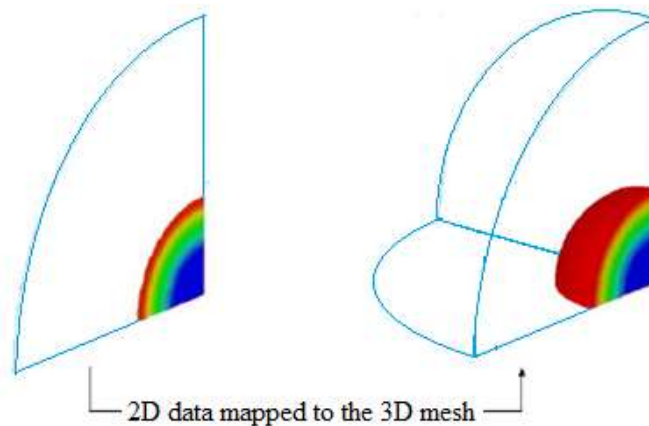
Para modelar o ar no LS-DYNA utiliza-se o modelo de material, \*MAT\_NULL juntamente com a EOS de gás perfeito. O \*MAT\_NULL requer apenas a introdução da massa específica do ar.

#### 4.4 *Mapping* 2D para 3D

A utilização da técnica ALE requer malhas bastante refinadas (alguns milímetros por elemento) o que, na maioria dos casos práticos se traduziria em modelos de vários milhões de elementos e um enorme esforço de computação. Consegue-se alguma economia no processamento se o problema for iniciado numa malha 2D, mais refinada, que permita simular a detonação do explosivo e alguns instantes da expansão dos produtos da combustão, de modo a que o processo se faça com uma resolução suficiente para permitir uma correta evolução da energia interna e cinética do fenómeno, sendo posteriormente os resultados do modelo 2D mapeados num modelo 3D. Os dados do modelo 2D são armazenados num ficheiro binário e o ficheiro binário é utilizado como condição inicial no modelo 3D. O modelo 3D lê os resultados do modelo 2D e continua simulação [43]. A técnica do *mapping* implementada no hidrocódigo LS-DYNA está bem documentada na literatura[46].

O propósito da técnica do *mapping* é, como se referiu, o de reduzir o tempo computacional numa simulação e diminuir os erros relativos entre resultados numéricos e experimentais [43]. Na simulação de explosões, o início da propagação da onda de choque gerada na detonação do explosivo dita uma importante regra na discretização da malha de elementos finitos: a malha de elementos finitos deve ser composta por elementos muito pequenos (Zakrinsson [43] utilizou malhas 2D com tamanhos de elementos entre 0.25 à 1 mm e malhas 3D com tamanhos de elementos entre 4 à 16 mm para simular a explosão do alto-explosivo TNT) por forma a modelar corretamente a geometria do explosivo e permitir uma correta propagação da onda de choque [41].

Uma outra grande vantagem da técnica do *mapping* é que o ficheiro binário do modelo 2D pode ser reutilizada em casos em que as condições iniciais de cálculos são idênticos, permitindo assim poupar o tempo gasto nesta fase de modelação 2D. Na Figura 4.1 apresenta-se uma representação esquemática que ilustra a aplicação da técnica do *mapping* no LS-DYNA, onde se pode observar o mapeamento dos resultados da simulação da detonação de um explosivo em uma malha 2D para uma malha 3D.



**Figura 4.1** – *Mapping* 2D para 3D [47].

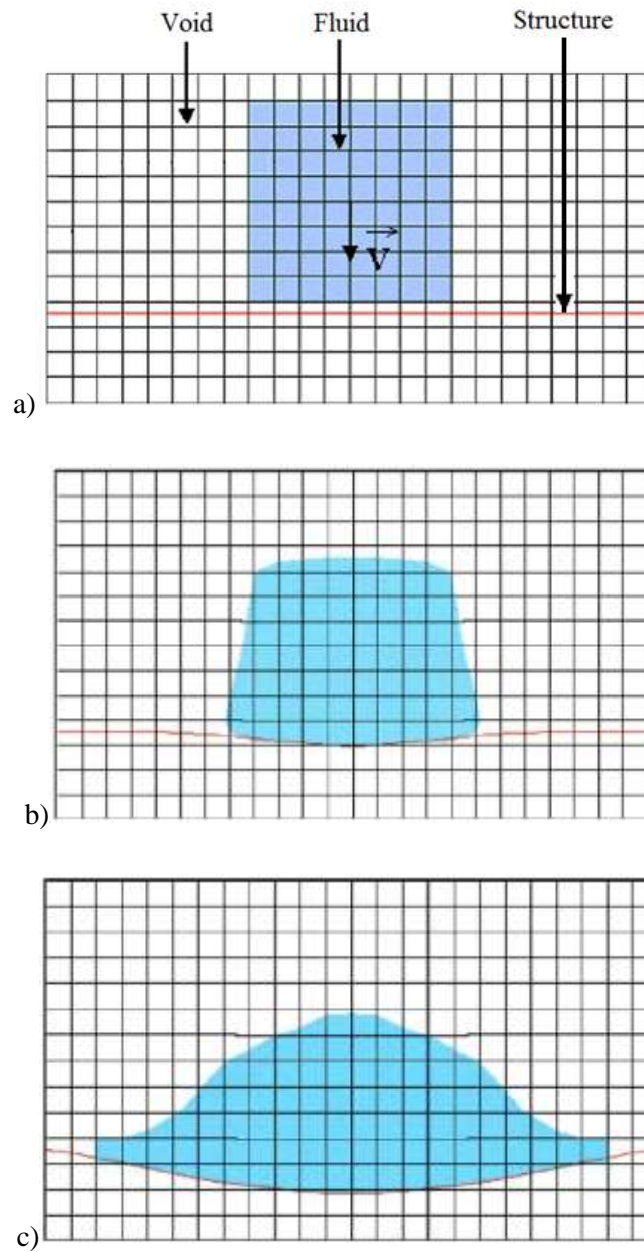
## 4.5 Interação fluido-sólido (FSI)

Os problemas de interação fluido-sólido ocorrem, por exemplo, quando forças hidrodinâmicas atuam numa estrutura rígida ou deformável [48]. Na engenharia naval, por exemplo, a tecnologia do FSI pode ser utilizada para estimar forças devido a efeitos hidrodinâmico, nomeadamente o efeito das ondas ou do escoamento num casco movendo-se a alta velocidade. A tecnologia do FSI permite prever corretamente as forças aplicadas resolvendo as equações hidrodinâmicas e usando um algoritmo de acoplamento apropriado para a transmissão de forças entre o fluido e a estrutura [48].

Nos problemas de explosões onde a onda de choque gerada na detonação do explosivo interage com a superfície de, por exemplo, uma estrutura de aço ou de betão, o FSI é utilizado para transmitir as forças geradas na detonação do explosivo à superfície da estrutura [1].

Segundo Aquelet [48], existem dois métodos que podem ser utilizados para resolver problemas de interação fluido-sólido: o método de contato e o método de acoplamento Euleriano-Lagrangiano. Nesta tese, apenas o método de acoplamento Euleriano-Lagrangiano será utilizado.

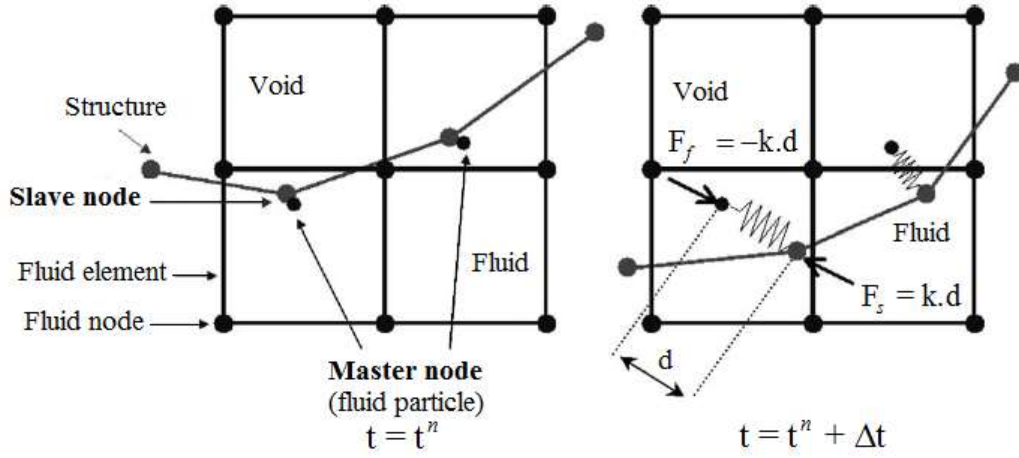
O método de acoplamento Euleriano-Lagrangiano está implementado no hidrocódigo LS-DYNA. Neste método, são consideradas duas malhas acopladas: uma malha Lagrangiana para o material sólido e uma malha Euleriana ou ALE para fluido. Considera-se o caso Euleriano representada na Figura 4.2, onde a malha é fixa no espaço e o fluido flui através dela (caso particular do método ALE). A malha Lagrangiana é envolvida na malha Euleriana.



**Figura 4.2** – a) Acoplamento entre duas malhas Lagrangiana e Euleriana, tempo = 0 ms, b) tempo = 0.15 ms, c) tempo = 0.5 ms [48].

No método de acoplamento, assim que o material fluido penetrar a malha Lagrangiana, forças de reação ou de acoplamento são aplicadas a ambos os nós da malha da estrutura e às partículas do fluido na zona de acoplamento, permitindo que haja uma resistência à penetração do material fluido na malha Lagrangeana [49]. Um nó da estrutura, na zona de acoplamento, é designado de nó escravo e uma partícula do fluido dentro de um elemento do fluido é designado de nó mestre [48].

O método de acoplamento pode ser visto como um sistema de molas, como se pode ver na Figura 4.3 [48]. As duas extremidades das molas são fixas aos nós ou pontos de acoplamento da estrutura e as partículas do fluido.



**Figura 4.3** – Representação esquemática do algoritmo de acoplamento [48].

A força de acoplamento é descrita pela expressão (4.9), onde,  $d$  é profundidade de penetração de uma partícula do fluido na estrutura e  $k$  representa a rigidez da mola.

$$F = kd \quad (4.9)$$

A força  $F$  descrita na equação (4.9) é aplicada tanto ao nó escravo da estrutura como ao nó mestre do fluido, em direções opostas, com o propósito de satisfazer o equilíbrio de forças na interface de acoplamento. A força aplicada no nó escravo da estrutura ( $F_s$ ) é dada pela equação (4.10), enquanto para o fluido, a força de acoplamento ( $F_f$ ) é distribuído pelos nós do elemento do fluido (equação (4.11)).

$$F_s = -F \quad (4.10)$$

$$F_f^i = N_i F \quad (4.11)$$

Onde  $N_i$  é a função de forma num nó  $i$  ( $i = 1 \dots 8$ ). Desde que  $\sum_{i=1}^8 F_f^i = N_i F$ , o princípio de ação-reação é satisfeito na interface de acoplamento. A força de acoplamento satisfaz o equilíbrio de forças na interface fluido-estrutura e reduz a penetração do fluido na estrutura [48].

A rigidez da mola ( $k$ ) é expressa pela equação (4.12), em termos do módulo volumétrico ( $K$ ) de um elemento do fluido contendo um nó escravo, do volume ( $V$ ) do elemento contendo o nó mestre e da média das áreas dos elementos da estrutura conectados ao nó escravo:

$$k = p_f \frac{KA^2}{V} \quad (4.12)$$

Onde,  $p_f$  é um fator escalar e deve estar contido no intervalo,  $0 \leq p_f \leq 1$ , por forma a evitar instabilidades.

## 4.6 Viscosidade artificial

A base matemática para todos os hidrocódigos baseia-se no pressuposto de que se está a lidar com um contínuo. As equações de conservação não modificadas (descritas na secção 2.3.2.1) produzem resultados errados na presença de uma onda de choque, uma vez que, a onda de choque é descontínua opondo-se assim ao princípio matemático dos hidrocódigos [31]. Normalmente surgem respostas oscilatórias na vizinhança da onda de choque, que é necessário amortecer de modo a permitir obter uma forma de onda o mais aproximada possível da onda de choque.

A solução deste problema foi proposta por Von Neumann e Richtmyer em 1950 [27], [31], [38]. Eles introduziram o conceito de viscosidade artificial, que tem como efeito transformar a descontinuidade apresentada na onda de choque num gradiente de tensão, permitindo assim que a onda de choque seja modelada [25].

A viscosidade artificial proposta por Von Neuman e Richtmyer em uma dimensão é dada pela expressão (4.13).

$$\begin{cases} q = C_0 \rho \Delta x^2 \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 & \text{se } \frac{\partial v}{\partial x} < 0 \\ q = 0 & \text{se } \frac{\partial v}{\partial x} \geq 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

Onde,  $C_0$  é uma constante adimensional e  $\Delta x$  é a largura do elemento.



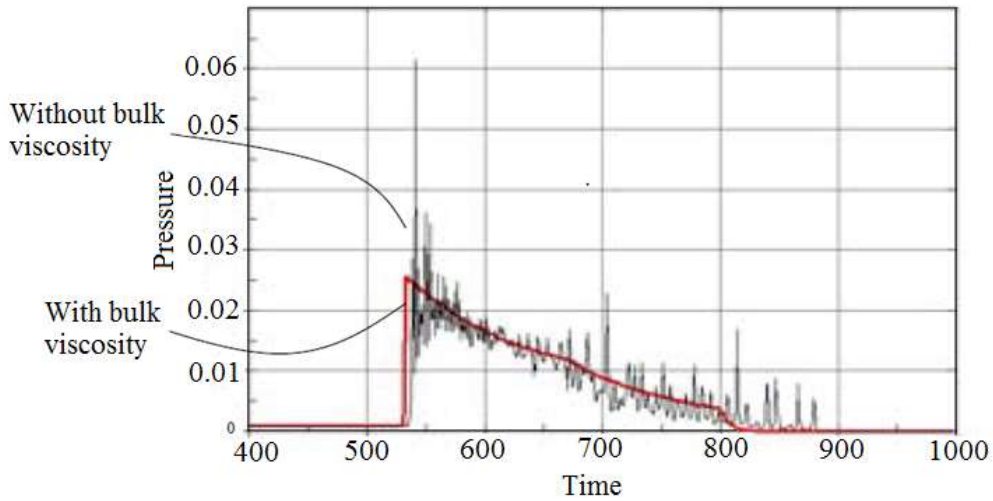
O parâmetro  $q$  é introduzido na pressão em ambas as equações de momento e energia ((3.22) e (3.23)). A utilização do parâmetro  $q$  satisfaz as seguintes condições: as equações de conservação ((3.21), (3.22) e (3.23)) produzem soluções sem descontinuidades; a espessura da onda de choque é independente da força imposta por esta e é da mesma ordem do  $\Delta x$  utilizado no problema; o termo  $q$  é insignificante fora da onda de choque; e as condições de descontinuidade são satisfeitas [27], [38].

Em 1955 Landshoff sugeriu a adição de um termo linear à expressão de Von Neuman e Richtmyer, resultando na expressão (4.14), em uma dimensão [38].

$$\begin{cases} q = C_0 \rho \Delta x^2 \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - C_1 \rho \Delta x c \frac{\partial v}{\partial x} & \text{se } \frac{\partial v}{\partial x} < 0 \\ q = 0 & \text{se } \frac{\partial v}{\partial x} \geq 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

Onde,  $C_1$  é uma constante adimensional e  $c$  é a velocidade do som no material.

O termo linear na expressão da viscosidade artificial é usado para suprimir as oscilações apresentadas atrás da onda de choque e o termo quadrático dissemina a frente de onda de choque ao longo de vários elementos na direção de propagação e diminui a amplitude do pico da onda [25]. Na Figura 4.4 ilustra-se o efeito da viscosidade artificial aplicada a uma onda de choque.



**Figura 4.4** – Comparação de uma onda de choque sem e com aplicação da viscosidade artificial [47]

A expressão da viscosidade artificial padrão utilizada pelo LS-DYNA é descrita pela expressão (4.15) [27], [38].

$$\begin{cases} q = \rho \cdot l_e \cdot (C_0 l_e \dot{\epsilon}_{kk}^2 - C_1 c \dot{\epsilon}_{kk}) & \text{se } \dot{\epsilon}_{kk} < 0 \\ q = 0 & \text{se } \dot{\epsilon}_{kk} \geq 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

Onde,  $\dot{\epsilon}_{kk}$  é o traço da taxa do tensor de deformação,  $C_0$  e  $C_1$  são constantes adimensionais com valores padrão de 1.5 e 0.06, respetivamente. O  $l_e$  é a raiz quadrada da área do elemento em 2D ( $l_e = \sqrt{A}$ ) ou a raiz cúbica do volume do elemento para casos 3D ( $l_e = \sqrt[3]{V}$ ). O  $c$  é a velocidade do som no material contido no elemento.

## 4.7 Condições de fronteiras

No LS-DYNA, existem duas formas de introduzir condições de fronteiras em modelos de elementos finitos: a utilização das condições de fronteiras de Euler (EBC) e da opção \*BOUNDARY\_SPC\_SET [42].

As condições de fronteiras de Euler (EBC) implementadas no LS-DYNA definem restrições de velocidade, por exemplo, nas fronteiras da malha de um fluido. Existem três opções disponíveis do EBC: a opção *off*, a opção *on with stick condition* e a opção *on with slip condition*. A opção *off* permite velocidades sem restrições nas fronteiras. A opção *on with stick condition* impõe que a velocidade de um nó ou conjunto de nós na fronteira seja igual a zero. A opção *on with slip condition* estabelece que a componente tangencial da velocidade do material é igual a zero para todos os nós na fronteira [42].

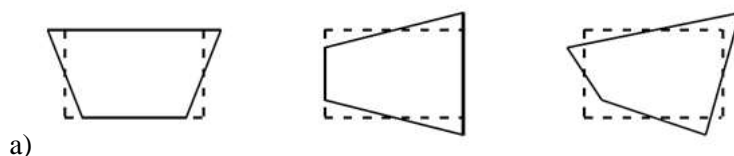
A opção \*BOUNDARY\_SPC\_SET do LS-DYNA permite definir constrangimentos de deslocamentos e de rotações dos eixos x, y para uma malha 2D e constrangimentos de deslocamentos para os planos normais aos eixos x, y, z e rotações dos eixos x, y, z para uma malha 3D. Selecionada a superfície ou a aresta a constreger é possível definir o estado de constrangimento (1 ou 0) de cada grau de liberdade dos nós dessa superfície ou aresta [42].

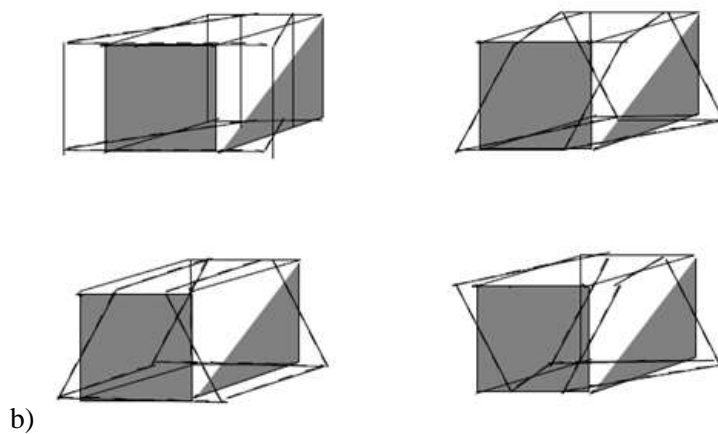
## 4.8 Elementos com um ponto de integração

Para malhas 2D, elementos quadriláteros podem ser integrados (cálculo do estado de tensão do material em cada iteração) em quatro pontos e para malhas 3D, elementos hexaedros podem ser integrados em oito pontos. O cálculo do estado de tensão do material para quatro pontos ou oito pontos é dispendioso em termos de tempo computacional. É possível ultrapassar este problema calculando o estado de tensão de um elemento apenas num único ponto do elemento (no centro), ou seja, utilizando elementos com um ponto de integração. Isto faz com que se economize nos cálculos (tempo computacional), mas resulta em certos tipos de deformações em 2D e em 3D que não são resistidas pelas forças internas [25]. Estas deformações não resistidas, ou seja que ocorrem sem variação de energia constituem modos de energia nula (*zero energy modes*) ou *hourglass modes* [27], [31]. Os modos de energia nula causam oscilações na solução e é necessário minimizá-los pois tais deformações, sendo não físicas, escondem a solução correta [29].

É possível controlar os modos de energia nula, por forma a manter as vantagens dos elementos com um ponto de integração. No LS-DYNA, para materiais modelados como ALE, recomenda-se a introdução de determinados parâmetros de controlo da solução numérica que introduzam alguma viscosidade interna que limite a ocorrência desses modos de energia nula, nomeadamente definindo os parâmetros  $IHQ = 1$  e  $QM = 1.E-6$  em \*HOURLASS [50].

Na Figura 4.5 apresenta-se alguns tipos de *hourglass modes* para elementos 2D e 3D com um ponto de integração.





**Figura 4.5** – Tipos de *haurglass modes* para elementos com um ponto de integração. a) *Haurglass modes* para elementos 2D, quadriláteros [29]. b) *Haurglass modes* para elementos 3D, hexaedros [27]



## Capítulo 5 Calibração da metodologia ALE e do modelo numérico

Neste capítulo, procura-se calibrar um modelo numérico que será utilizado para conduzir o estudo paramétrico da explosão de um alto-explosivo num espaço confinado. Para isso, verificar-se-á a capacidade do programa de elementos finitos, LS-DYNA, em simular corretamente problemas de explosões utilizando a metodologia ALE, através da realização de um exemplo da simulação da explosão ao ar livre do alto-explosivo C-4<sup>4</sup>. Os resultados numéricos obtidos serão comparados com os resultados do trabalho de Alia [37]. Posteriormente, utilizando a formulação multi-material ALE (MMALE) realizar-se-á um segundo exemplo que considera a simulação e análise da detonação do explosivo TNT dentro de uma caixa fechada com a finalidade de calibrar o modelo geométrico escolhido bem como os parâmetros utilizados para gerar a onda de choque explosiva. Proceder-se-á à comparação dos resultados numéricos obtidos com os resultados do trabalho de Hu [5].

### 5.1 Calibração do método ALE

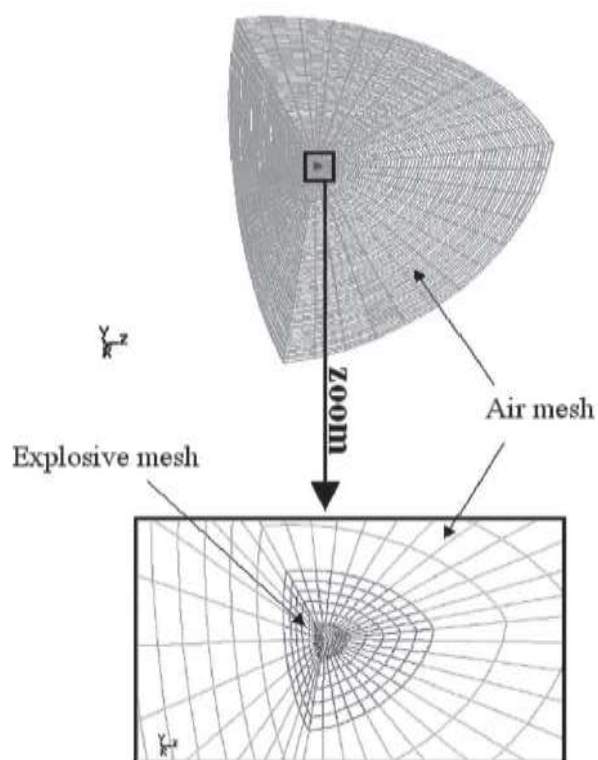
A fim de calibrar a capacidade da formulação multi-material Euleriana (caso particular do método ALE implementada no LS-DYNA para a simulação de problemas de explosões) utilizada nas simulações da presente tese, considerou-se o exemplo da simulação da detonação do C-4 ao ar livre do trabalho Alia [37]. No âmbito desta simulação, dois métodos de advecção foram utilizados: o método de advecção de Van Leer (utilizado por Alia [37]) e o Donor Cell. Os resultados obtidos com ambos os métodos foram posteriormente comparados com os resultados numéricos e experimentais do trabalho utilizado nesta calibração [37].

#### 5.1.1 Simulação da explosão do alto-explosivo C-4 ao ar livre

Alia [37], simulou a detonação do C-4 através de duas malhas, uma composta por 27972 elementos e a outra composta por 56916 elementos. Em ordem a reduzir o tempo de simulação, assumiram que o domínio do problema era simétrico e as malhas foram modeladas com o formato de 1/8 de uma esfera com três planos simétricos. Na Figura 5.1 ilustra-se a malha de 56916 elementos utilizada nesse trabalho. O alto-explosivo C-4 utilizado nesse trabalho era de formato esférico e possuía 4.07 cm de raio e 454 g de massa.

---

<sup>4</sup> C-4 é um alto-explosivo composto por 91 % de ciclotrimetilenotrinitramina (RDX) e 9 % de plastificantes não explosivos [53].



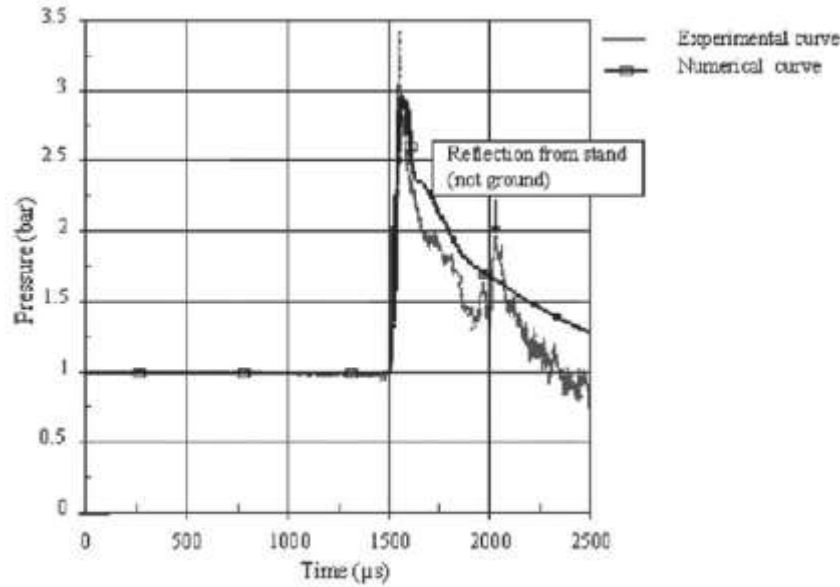
**Figura 5.1** – Malha de 56916 elementos do explosivo e do ar utilizada por Alia [37].

Os resultados numéricos (intensidade do pico de pressão e o tempo de chegada do pico de pressão) obtidos com um sensor localizado à distância de 152.4 cm do centro do explosivo e os resultados experimentais do trabalho de Alia [37] figuram-se na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1** – Resultados numéricos e experimentais (intensidade do pico de pressão e o tempo de chegada do pico de pressão) do trabalho de Alia [37].

Resultados	Malhas	P [Mbar]	T [ $\mu$ s]
Numéricos	27972 Elementos	2.7E-6	1.44E3
	56916 Elementos	2.9E-6	1.5E3
Experimental		2.96E-6	1.5E3

Segundo Alia [37], os melhores erros relativos entre os resultados experimentais e numéricos calculados (intensidade do pico de pressão e o tempo de chegada do pico de pressão) foram menores ou iguais a 2% e foram conseguidas com a malha de 56916 elementos. No gráfico da Figura 5.2 apresentam-se a comparação das curvas de pressão em função do tempo, numérica (obtido com a malha de 56916 elementos) e experimental, para o sensor localizado à distância de 152.4 cm do centro do explosivo.



**Figura 5.2** – Comparação das curvas de pressão, numérica e experimental de um sensor localizado à 152.4 mm do centro do explosivo [37].

Neste trabalho, para simular o problema do trabalho de Alia [37] e consequentemente calibrar o método ALE, quatro malhas com o formato de 1/8 de uma esfera de 300 cm de raio, com três planos simétricos e com números de elementos diferentes foram utilizadas. A pressão máxima e o instante de tempo em que ocorre a pressão máxima foram utilizados como critérios para a calibração.

#### 5.1.1.1 Descrição das malhas de elementos finitos

O programa de elementos finitos, ANSYS, foi utilizado para gerar as quatro malhas utilizadas neste problema e o programa do MATLAB descrito no ANEXO-A foi utilizada para converter os ficheiros *.txt* das malhas geradas no ANSYS para ficheiros *.k* do LS-PrePost. No ANEXO-B está apresentado um ficheiro APDL que demonstra o procedimento da geração das malhas no ANSYS.

As quatro malhas são constituídas por elementos sólidos hexaedros não uniformes. A Tabela 5.2 apresenta os números de elementos relativamente às quatro malhas.

**Tabela 5.2** – Número de elementos das quatro malhas utilizadas neste problema.

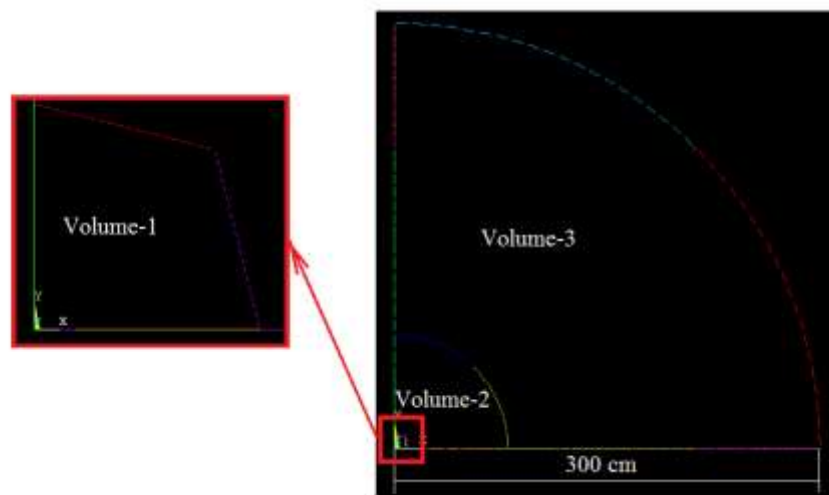
Malhas	Raio [cm]	Nº de elementos
Malha 1	300	61696
Malha 2		110000
Malha 3		128000
Malha 4		156250



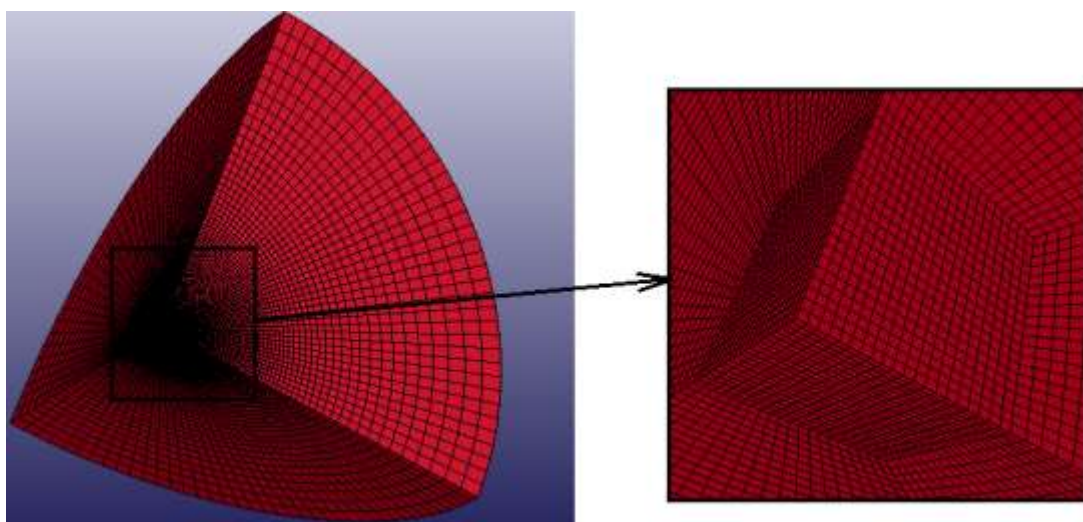
Na Figura 5.3 e na Figura 5.4 ilustram-se a configuração das malhas utilizadas neste problema. Como se pode ver na Figura 5.3 malha é composta por três volumes: volume-1, volume-2 e volume-3.

O volume-1, para todas as quatro malhas, é composto por elementos com tamanhos aproximadamente de 5 mm de lado. Os volumes 2 e 3 são constituídos por elementos maiores que vão crescendo progressivamente ao longo do raio.

O volume-1 é ligado ao volume-2 que por sua vez é ligado ao volume-3. Os elementos nas zonas de transição entre o volume-1 e o volume-2 têm tamanhos quase iguais, por forma a permitir que a onda de choque gerada na detonação do explosivo se propague corretamente. Verificou-se também esta condição para a zona de transição entre o volume-2 e o volume-3.



**Figura 5.3** – Configuração das quatro malhas geradas no ANSYS.



**Figura 5.4** – Malha de 110000 elementos finitos com o formato de 1/8 de uma esfera.

### 5.1.1.2 Definição do problema no LS-DYNA

A simulação do problema da explosão do alto-explosivo C-4 ao ar livre no LS-DYNA requer a modelação de duas partes (\*PART) na malha de elementos finitos, correspondentes ao alto-explosivo C-4 e ao ar envolvente. À cada parte é associado um material, uma equação de estado e um tipo de elemento.

A opção \*INICIAL\_VOLUME\_FRACTION\_GEOMETRY do LS-DYNA foi utilizada para definir os volumes do alto-explosivo C-4 e do ar dentro das malhas de elementos finitos e posteriormente, a esses volumes foram associadas as partes (\*PART) correspondentes ao explosivo e ao ar.

O alto-explosivo C-4 e o ar foram modelados com elementos multi-material ALE com um ponto de integração (ELFORM = 11 em \*SECTION\_SOLID). A utilização deste tipo de elementos requer definir um modo de controlo do *hourglass mode* gerado neste tipo de elementos, para isso, o modo padrão recomendado pelo LS-DYNA foi utilizado (IHQ = 1 e QM = 1E-6 em \*HOURLASS).

A equação de estado de JWL (\*EOS\_JWL) e o modelo de material \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN do LS-DYNA foram utilizadas na modelação do explosivo C-4. Na Tabela 5.3 apresentam-se os valores numéricos para os parâmetros da EOS de JWL do explosivo C-4 e na Tabela 5.4 apresentam-se os valores numéricos para os parâmetros do modelo de material \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN do explosivo C-4.

**Tabela 5.3** – Parâmetros para a EOS de JWL do explosivo C-4 [37].

A [Mbar]	B [Mbar]	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	ω	E [Mbar]
5.98155	0.13750	4.5	1.5	0.32	0.087

**Tabela 5.4** – Parâmetros para o modelo de material MAT-HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN do explosivo C-4 [37].

D [cm/μs]	ρ [g/cm <sup>3</sup> ]	P <sub>CJ</sub> [Mbar]
0.804	1.601	0.281

A EOS polinomial linear (\*EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL) e o modelo de material \*MAT\_NULL foram utilizados para modelar o ar. Na Tabela 5.5 apresentam-se os valores numéricos dos parâmetros da EOS polinomial linear para o ar e na Tabela 5.6 apresentam-se os valores numéricos dos parâmetros do modelo de material \*MAT\_NULL para o ar.

**Tabela 5.5** – Parâmetros da EOS polinomial linear para o ar [37].

$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3 = C_6$	$C_4 = C_5$	$E_0$ [Mbar]
0	0	0	0	0.4	2.5E-6

**Tabela 5.6** Parâmetros do modelo de material, MAT\_NULL para o ar [37]

$\rho_0$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$P_{CJ}$ [Mbar]
1,293E-3	0

Para definir a análise ALE no LS-DYNA, foi utilizada a opção  $DCT = 1$  em \*CONTROL\_ALE.

Neste problema, com o objetivo de reduzir o tempo computacional, as malhas de elementos finitos foram modelados com o formato de 1/8 de uma esfera com três planos simétricos. Para simular as condições de simetria dos três planos, a opção *on with slip condition* ( $EBC = 2$  em \*CONTROL\_ALE) das condições de fronteiras de Euler foi utilizada. Na parte esférica das malhas não foram utilizadas condições de fronteiras, pelo que a opção *off* ( $EBC = 0$  em \*CONTROL\_ALE) das condições de fronteiras de Euler foi utilizada por forma a permitir velocidades sem restrições nos nós da parte esférica das malhas.

Este exemplo foi simulado utilizando dois métodos de advecção, o de Van Leer e o de Donor Cell ( $METH = 2$  e  $METH = 3$  em \*CONTROL-ALE).

O ponto de detonação do explosivo foi definido no centro do explosivo especificando as coordenadas do centro do explosivo na opção \*INICIAL\_DETONATION do LS-DYNA.

O sensor utilizado para registar a pressão em função do tempo, à distância de 152.4 cm do centro do explosivo, foi definido utilizando opção \*DBASE\_TRACER do LS\_DYNA. A simulação foi corrida de 0 à 2000  $\mu s$  ( $ENDTIM = 2000$  em \*CONTROL\_TERMINATION), permitindo simular a detonação completa do alto-explosivo C-4 e a propagação da onda de choque para além da distância de 152.4 cm do centro do explosivo, onde se localizava o sensor.

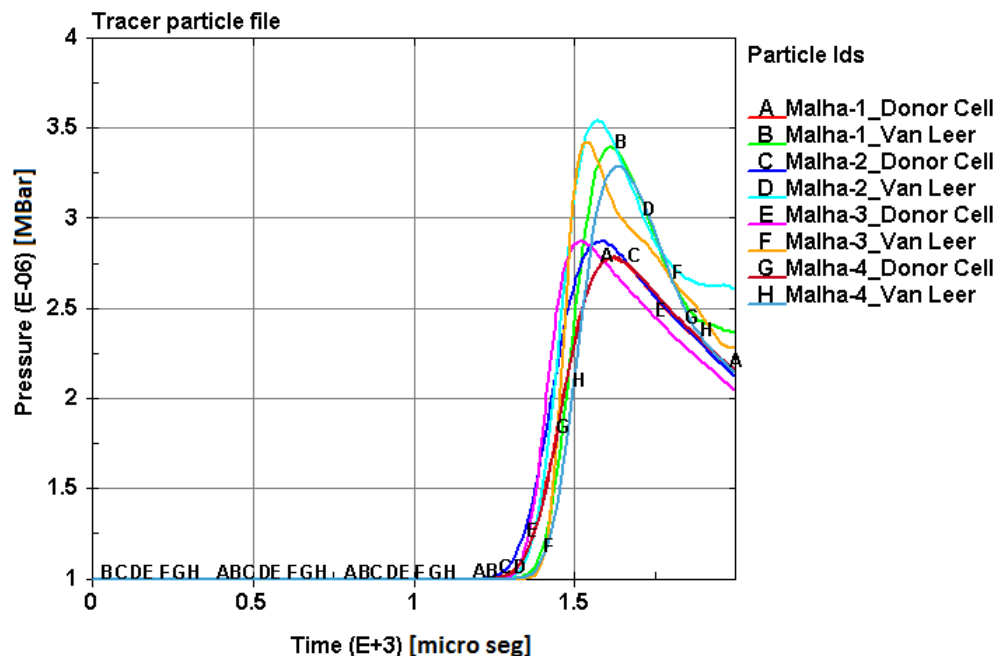
No ANEXO-C apresentam-se os comandos utilizados para modelar a explosão do alto-explosivo C-4 ao ar livre, no LS-DYNA.

### 5.1.1.3 Apresentação e análise de resultados

Os resultados numéricos (intensidade do pico de pressão e o tempo de chegada do pico de pressão) da simulação da detonação do C-4 ao ar livre estão apresentados na Tabela 5.7. Estão descritos os resultados obtidos com os dois métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell para as quatro malhas utilizadas neste trabalho. A Figura 5.5 mostra as curvas de pressão em função do tempo obtidas com as quatro malhas e com os dois métodos de advecção.

**Tabela 5.7** – Resultados obtidos com as quatro malhas com os métodos de advecção de Van Leer e Donor Cell.

Malhas	Nº de elementos	Método de advecção	P [Mbar]	T [ $\mu$ s]	Tempo de simulação [h.min.sec]
Malha 1	61696	Van Leer	3.40E-6	1.62E3	0.3.25
		Donor Cell	2.79E-6	1.62E3	0.1.56
Malha 2	110000	Van Leer	3.55E-6	1.57E3	0.7.17
		Donor Cell	2.88E-6	1.59E3	0.4.32
Malha 3	128000	Van Leer	3.43E-6	1.54E3	0.9.1
		Donor Cell	2.88E-6	1.53E3	0.5.18
Malha 4	156250	Van Leer	3.30E-6	1.64E3	0.13.48
		Donor Cell	2.79E-6	1.61E3	0.8.12



**Figura 5.5** – Curvas de pressão em função do tempo obtidos com os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell para as malhas 1, 2, 3 e 4.

Nota-se que as curvas de pressão obtidas com o método de advecção de Donor Cell para as malhas 1 e 4 na Figura 5.5 estão sobrepostas.

Na Tabela 5.8 apresentam-se os erros relativos entre os resultados experimentais do trabalho de Alia [37] e os resultados numéricos obtidos neste exemplo, para ambos os métodos de advecção de Van Leer e Donor Cell.

**Tabela 5.8** – Erros relativos entre os resultados experimentais e os resultados numéricos, para ambos os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell.

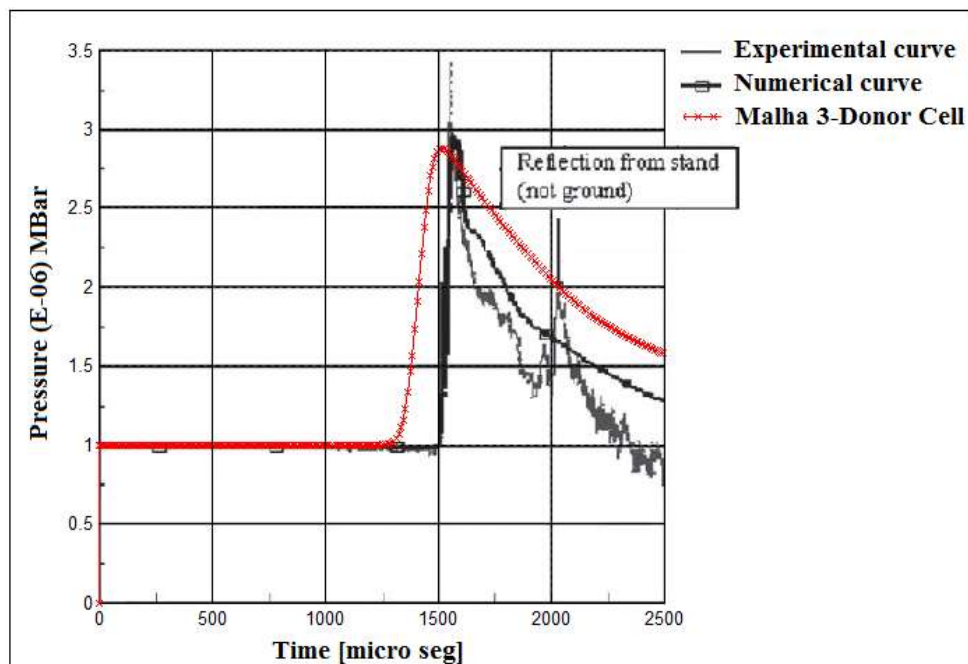
Malhas	Nº de elementos	Método de advecção	Erro relativo [%]	
Malha 1	61696	Van Leer	14.865	8.000
		Donor Cell	5.743	8.000
Malha 2	110000	Van Leer	19.932	4.667
		Donor Cell	2.703	6.000
Malha 3	128000	Van Leer	15.878	2.667
		Donor Cell	2.703	2.000
Malha 4	156250	Van Leer	11.486	9.333
		Donor Cell	5.743	7.333

Analisando os resultados numéricos obtidos (Tabela 5.7), pôde-se concluir que dois parâmetros que podem influenciar os resultados são: o grau de discretização da malha de elementos finitos e o método de advecção utilizado (método de Van Leer ou Donor Cell).

Na dinâmica dos fluidos computacionais (CFD), a influência do grau de discretização das malhas de elementos finitos já é bem conhecido, todos os métodos de discretização introduzem erros na solução devido a escolha do grau de discretização do tempo e do espaço [51]. Sherkar [12] simulou a detonação de TNT interagindo com uma coluna rígida utilizando o LS-DYNA e demonstrou que os resultados (pico de pressão) obtidos eram muito dependentes do grau de discretização da malha de elementos finitos.

Alia [37], utilizou o método de advecção de Van Leer na simulação da detonação do C-4 ao ar livre. Como já se tinha referido na secção 3.1.6, o método de advecção de Van Leer é um método de segunda ordem e consequentemente, mais preciso que o método de Donor Cell que é um método de primeira ordem. Outros trabalhos [1], [43], [34], utilizaram o método de advecção de Van Leer em detrimento do de Donor Cell na simulação de fenómenos de explosões. No entanto, neste trabalho, os valores dos erros relativos obtidos com o método de advecção de Donor Cell são menores que os obtidos com o método de advecção de Van Leer para todas as quatro malhas, como se pode observar na Tabela 5.8.

Os melhores resultados foram conseguidos com a malha de 128000 elementos (malha 3) utilizando o método de advecção de Donor Cell, onde o erro relativo entre os valores experimentais e numéricos do pico de pressão e do tempo de chegada do pico de pressão foram de 2.703 % e 2 %, respetivamente. Na Figura 5.6 apresenta-se a comparação das curvas de pressão experimental e numérico do trabalho de Alia [37] com a curva de pressão obtida com a malha de 128000 elementos e com o método de advecção de Donor Cell. Tendo em conta os resultados obtidos, concluiu-se que utilizando o método de advecção de Donor Cell, o fenómeno físico de explosão pode ser adequadamente simulado utilizando o método MMALE.



**Figura 5.6** – Comparação das curvas de pressão experimental e numérico do trabalho de Alia [37] com a curva de pressão obtida com a malha de 128000 elementos e o método de advecção de Donor Cell.

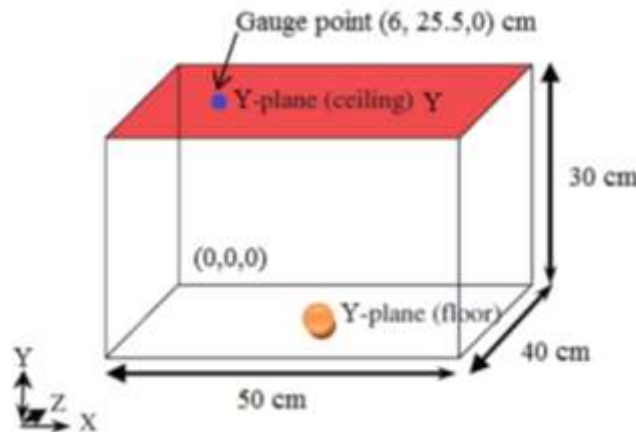
Uma outra observação é que, como se tinha referido na secção 3.1.6, o método de advecção de Van Leer requer maior tempo computacional que o método de advecção de Donor Cell, como se pode constatar na Tabela 5.7.

## 5.2 Calibração do modelo numérico

Nesta secção, para calibrar o modelo numérico que será utilizado para conduzir o estudo paramétrico de explosões confinadas da presente tese, o hidrocódigo LS-DYNA foi utilizado para simular o exemplo numérico da simulação da explosão dentro de uma caixa fechada do trabalho de Hu [5], utilizando a metodologia ALE calibrada na secção 5.1. A pressão máxima e o tempo em que ocorre a pressão máxima foram utilizados como critérios para a calibração. A densidade da malha, os modelos constitutivos de materiais e as equações de estados foram os parâmetros considerados durante a calibração.

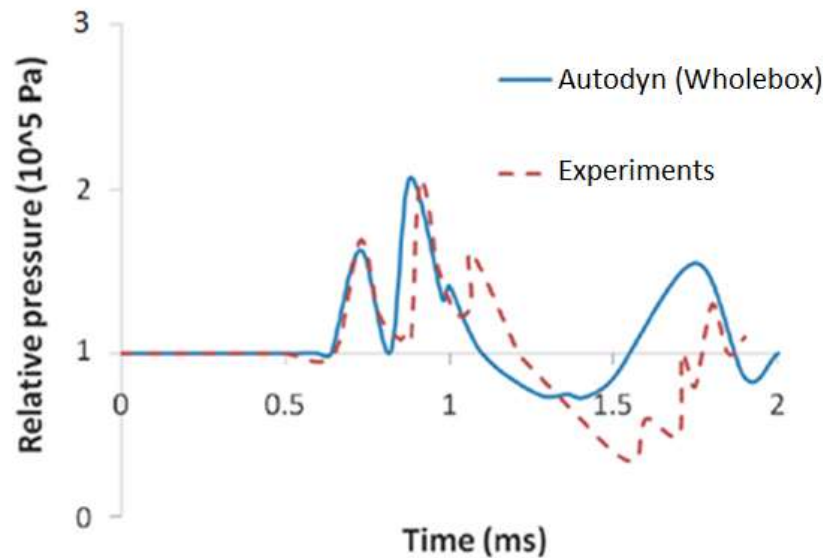
### 5.2.1 Simulação da explosão do alto-explosivo TNT numa caixa fechada

Hu [5], no âmbito de conduzir um estudo paramétrico sobre explosão confinada, utilizou o hidrocódigo AUTODYN para gerar um modelo numérico utilizado nesse estudo. Para calibrar o modelo numérico, simulou a explosão de uma massa de TNT no interior de uma caixa fechada e os resultados numéricos obtidos foram comparados com resultados experimentais do trabalho de Zyskowski [7]. Na Figura 5.7 ilustra-se a representação esquemática da caixa utilizada no trabalho de Hu [5], com dimensões,  $x, y, z = 50, 30, 40$  [cm] e com um sensor posicionado em  $x, y, z = 6, 25.5, 0$  [cm].



**Figura 5.7** – Representação esquemática da caixa confinada do trabalho de Hu [5], com dimensões,  $x, y, z = 50, 30, 40$  [cm] e com um sensor posicionado em  $x, y, z = 6, 25.5, 0$  [cm].

Na simulação da detonação de TNT dentro da caixa fechada [5], uma única malha foi utilizada para modelar a estrutura da caixa, o ar contido no interior da caixa e o TNT. A caixa foi assumida como sendo infinitamente rígida tendo essa rigidez sido modelada através da introdução de condições de fronteiras apropriadas para simular as paredes da caixa. A Figura 5.8 ilustra a curva de pressão numérica do trabalho de Hu [5] comparada com a curva de pressão experimental do trabalho de Zyskowski [7], para o sensor localizada na posição  $x, y, z = 6, 25.5, 0$  [cm] da caixa.



**Figura 5.8** – Curva de pressão numérica do trabalho de Hu [5] comparada com a curva de pressão experimental do trabalho de Zyskowski [7], para o sensor localizada na posição  $x, y, z = 6, 25.5, 0$  [cm] da caixa.

Neste trabalho, o exemplo da explosão no interior da caixa fechada foi simulado por duas vezes. A primeira consistiu em utilizar o mesmo procedimento utilizado em [5], ou seja, utilizar uma única malha para modelar a estrutura da caixa, o ar contido no interior da caixa e o TNT. O objetivo desta primeira simulação foi o de verificar a capacidade do LS-DYNA em simular explosões confinadas, utilizando a metodologia ALE, dado que, não se encontraram estudos sobre simulações de explosões confinadas utilizando o hidrocódigo LS-DYNA. Posteriormente, o exemplo foi reproduzido utilizando a tecnologia do FSI com o método de acoplamento Euleriano-Lagrangiano implementado no LS-DYNA. Nas duas simulações foram utilizadas os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell e os resultados obtidos com ambos os métodos foram comparados com os resultados de Hu [5].



### 5.2.1.1 Verificação da capacidade do LS-DYNA em simular explosões confinadas

No âmbito da simulação da detonação do TNT dentro da caixa fechada, a técnica do *mapping* 2D para 3D descrita na secção 4.4 foi utilizada com o fim de diminuir o tempo computacional e obter resultados precisos. Como já se tinha referido na secção 4.4 a técnica do *mapping* requer a utilização de duas malhas, uma malha 2D para iniciar a simulação e uma malha 3D onde são mapeados os resultados obtidos com a malha 2D. A simulação prossegue na malha 3D. Na simulação deste exemplo, três malhas 3D com tamanho de elementos diferentes foram utilizadas, e para cada uma delas foi também utilizada uma malha 2D também com tamanhos de elementos diferentes (Tabela 5.9).

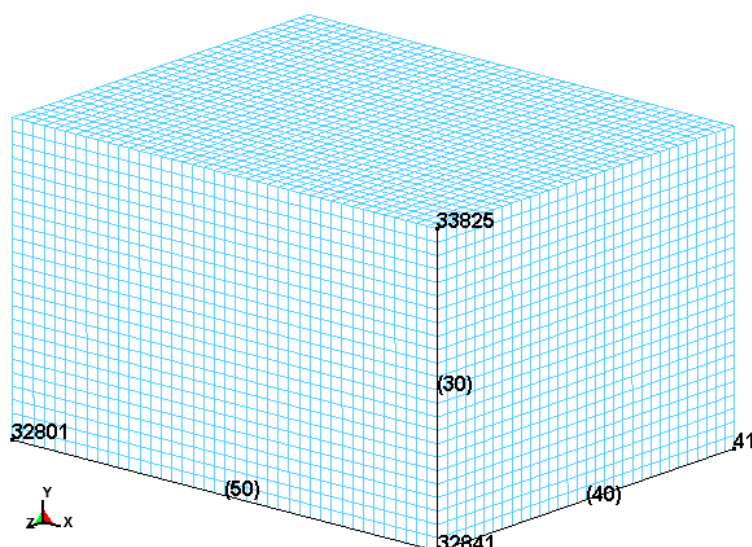
#### 5.2.1.1.1 Descrição das malhas de elementos finitos

As malhas 2D e 3D utilizadas neste exemplo foram geradas no pré-processador LS-PrePost. As malhas 3D foram construídas com elementos sólidos hexaédrais uniformes e as malhas 2D com elementos *Shell* quadriláteros uniformes. As malhas 3D possuem as mesmas dimensões da caixa utilizado no trabalho de Hu [5]. Na Tabela 5.9 estão descritas os tamanhos dos elementos e as dimensões para as respetivas malhas 2D e 3D utilizadas neste problema.

**Tabela 5.9** – Tamanhos dos elementos e dimensões das malhas 2D e 3D.

Caso	Malhas			
	2D		3D	
	Dimensão (x, y) [cm]	Tamanho dos elementos [cm]	Dimensão (x, y, z) [cm]	Tamanho dos elementos [cm]
1	(25, 30)	0,02	(50, 30, 40)	0,625
2		0,04		1,25
3		0,08		2,5

A Figura 5.9 apresenta a malha 3D com tamanho de elementos igual à 1.25 cm, que ilustra a configuração das malhas 3D utilizadas neste exemplo.



**Figura 5.9** – Malha de elementos finitos 3D com dimensões  $(x, y, z) = (50, 30, 40)$  e com elementos uniformes de tamanho = 1,25 cm.

#### 5.2.1.1.2 Definição do problema no LS-DYNA

Para todos os três casos das simulações (Tabela 5.9), o procedimento adotado para modelar a explosão no LS-DYNA foi o mesmo, pelo que, neste trabalho apenas se descreve a modelação da explosão do caso 2 da Tabela 5.9.

Como a técnica do *mapping* 2D para 3D foi utilizada neste exemplo, a simulação foi iniciada no modelo 2D e posteriormente os resultados foram mapeados no modelo 3D.

A modelação de uma explosão num modelo 2D faz-se de modo semelhante ao modelo 3D [46]. Então, a malha de elementos finitos 2D foi dividida em duas partes (\*PART), correspondentes ao explosivo e ao ar envolvente, utilizando a função \*INICIAL-VOLUME-FRACTION-GEOMETRY do LS-DYNA. Para cada parte foram definidos um material uma equação de estado e um tipo de elemento.

O explosivo TNT e o ar foram modelados utilizando elementos multi-material ALE com um ponto de integração (ELFORM = 11 em \*SECTION\_ALE2D) e o modo controlo do *hourglass mode* recomendado pelo LS-DYNA (IHQ = 1 e QM = 1E-6 em \*HOURLASS).

As mesmas equações de estado e modelos de materiais utilizados no exemplo da explosão ao ar livre (secção 5.1.1) foram utilizadas para modelar o explosivo TNT e o ar. Os parâmetros para a equação de estado e para o modelo de material do ar são os mesmos do problema da secção 5.1.1 (Tabela 5.5 e Tabela 5.6). Para o alto-explosivo TNT, os parâmetros da equação de estado estão apresentadas na Tabela 5.10 e os parâmetros para o modelo de material na Tabela 5.11.

**Tabela 5.10** – Parâmetros para a EOS de JWL do explosivo TNT [1].

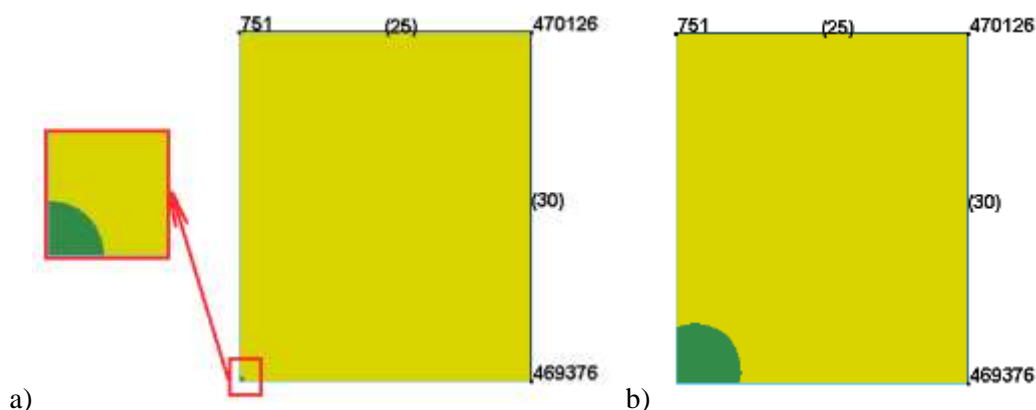
A [Mbar]	B [Mbar]	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	ω	E [Mbar]
3.7120	0.03231	4.15	0.95	0.3	0.07

**Tabela 5.11** – Parâmetros para o modelo de material MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN do explosivo TNT [1].

D [cm/μs]	ρ [g/cm <sup>3</sup> ]	P <sub>CJ</sub> [Mbar]
0.6930	1.59	0.21

A análise ALE e os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell foram definidos via DCT = 1 e METH = 2 ou 3 (2 para o método de Van Leer e 3 para o método de Donor Cell) em \*CONTROL\_ALE.

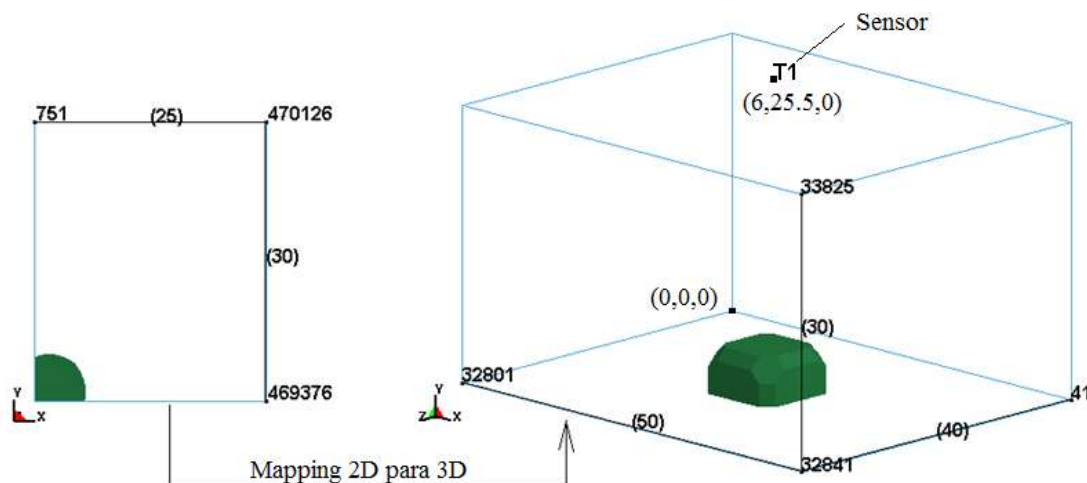
A simulação no modelo 2D foi corrida de 0 à 30 μs (ENDTIM = 30 em \*CONTROL\_TERMINATION), permitindo simular a detonação do explosivo e alguns instantes da expansão dos produtos da combustão. O modelo 3D continuou a simulação a partir dos 30 μs. A Figura 5.10 ilustra a simulação da detonação do explosivo TNT com o método de advecção de Donor Cell na malha 2D com tamanho de elementos igual a 0.04 cm, nos instantes de tempo de 0 e 30 μs.



**Figura 5.10** – Simulação da explosão do alto-explosivo TNT com o método de advecção de Donor Cell na malha 2D com tamanho de elementos igual a 0.04 cm. a) Tempo de simulação = 0 μs; b) Tempo de simulação = 30 μs.

Nota-se que antes de mapear os resultados do modelo 2D no modelo 3D, as partes (\*PART) correspondentes ao ar e ao explosivo foram definidos no modelo 3D. As mesmas equações de estado e modelos de materiais definidas para o modelo 2D foram definidas para o modelo 3D, bem como o tipo de elemento.

Neste problema, o explosivo localizava-se no centro do chão da caixa. Os dados do modelo 2D podem ser mapeados em diferentes partes do modelo 3D, definindo a origem do sistema de coordenadas (x, y, z) e a direção do eixo de simetria (o eixo de simetria é definido no modelo 2D) no comando `*INITIAL_ALE_MAPPING` do LS-DYNA [46]. A Figura 5.11 ilustra o mapeamento dos dados do modelo 2D no centro do chão do modelo 3D.



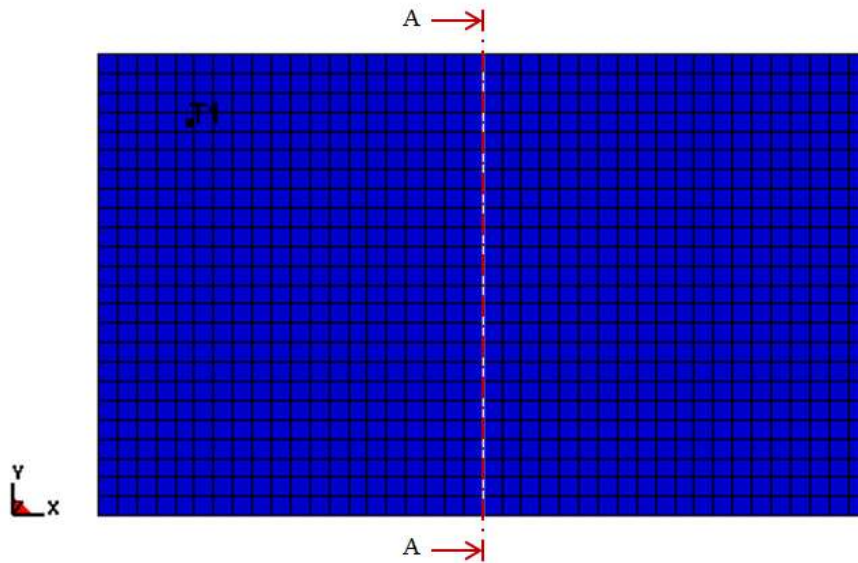
**Figura 5.11** – Mapeamento dos dados do modelo 2D no centro do chão do modelo 3D.

A caixa foi assumida como sendo infinitamente rígida e para simular as paredes rígidas da caixa, os deslocamentos normais às superfícies livres da caixa foram constrangidos utilizando a opção `*BOUNDARY-SPC-SET` do LS-DYNA.

A simulação no modelo 3D foi corrida de 30 à 2500  $\mu\text{s}$  (`ENDTIM = 2500` em `*CONTROL_TERMINATION`), permitindo simular a expansão dos produtos da reação até interagirem com as paredes rígidas do modelo numérico e posteriormente, serem refletidas. Para registrar a pressão em função do tempo na posição x, y, z = 6, 25.5, 0 [cm] da caixa, utilizou-se a opção `*DBASE_TRACER` do LS-DYNA.

No ANEXO-D e no ANEXO-E, apresentam-se os comandos utilizados para modelar a explosão do TNT no interior da caixa fechada no LS-DYNA, para os modelos 2D e 3D, respectivamente.

Na Figura 5.12, um plano x passando pelo centro do explosivo ilustra a propagação da onda de choque gerada na detonação do alto-explosivo TNT dentro do modelo numérico da caixa confinada, para diferentes instantes de tempo, simulado com o método de advecção de Donor Cell.



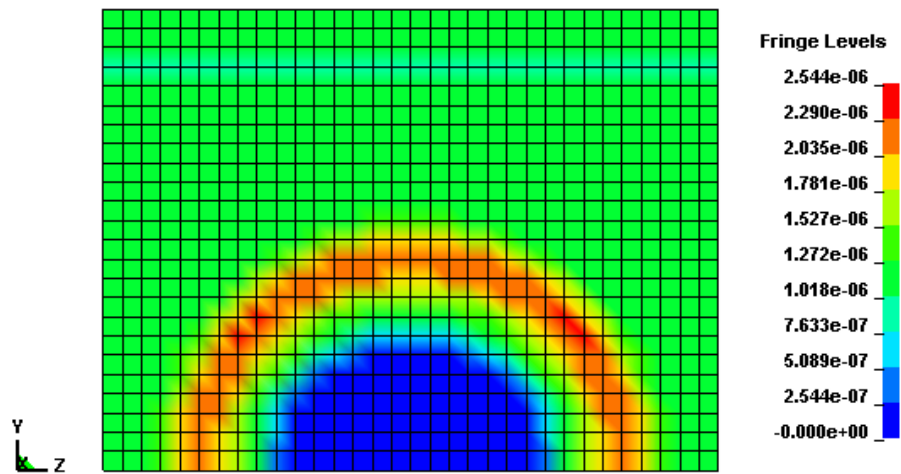
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time = 148.56

Contours of Pressure

min=0, at elem# 9618

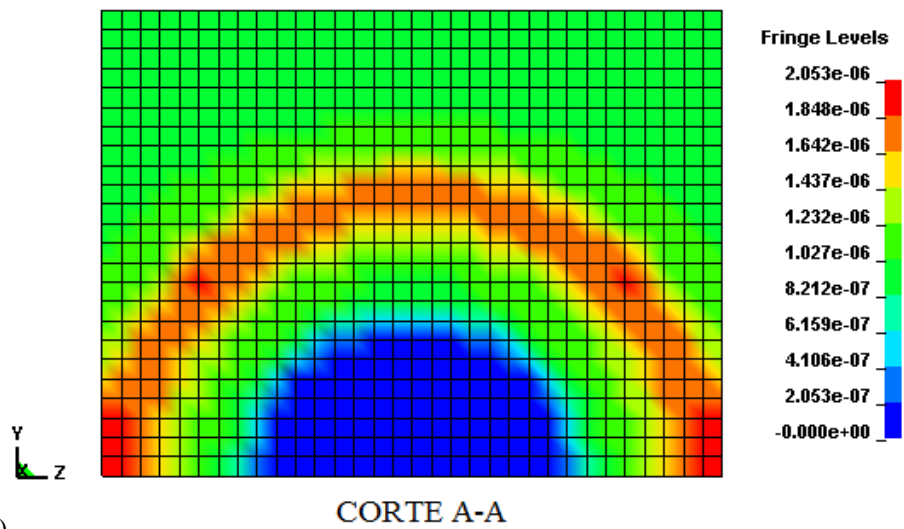
max=2.54426e-06, at elem# 8907



a)

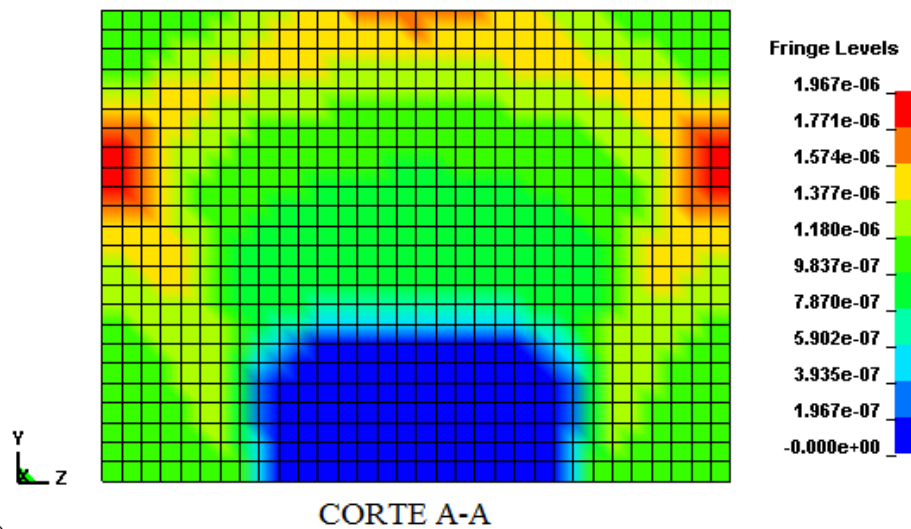
CORTE A-A

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Time = 238.63  
Contours of Pressure  
min=-0, at elem# 8659  
max=2.05307e-06, at elem# 20



b)

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Time = 484.42  
Contours of Pressure  
min=-0, at elem# 8657  
max=1.96749e-06, at elem# 5921



c)

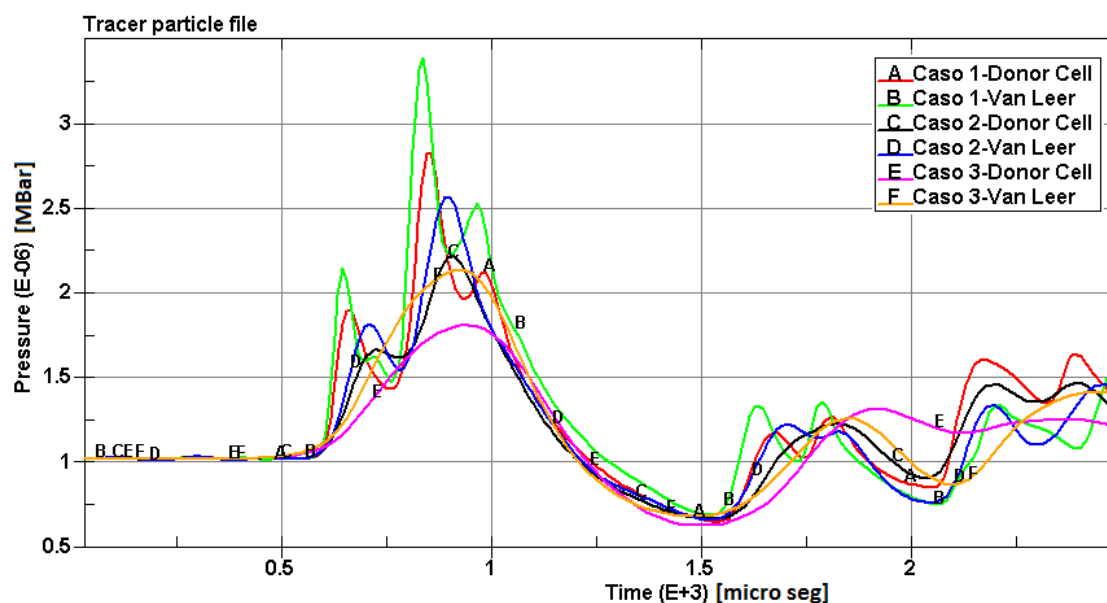
**Figura 5.12** – Propagação da onda de choque gerada na detonação do alto explosivo TNT dentro do modelo numérico da caixa confinada, simulada com o método de advecção de Donor Cell: a) No instante de tempo  $t = 149 \mu s$ ; b) No instante de tempo  $t = 239 \mu s$ ; c) No instante de tempo  $t = 484 \mu s$ .

### 5.2.1.1.3 Resultados

Na Tabela 5.12, apresentam-se os resultados da simulação da detonação do TNT dentro da caixa fechada. Estão apresentados os resultados obtidos com as três malhas consideradas e com os dois métodos de advecção de Van Leer e Donor Cell. A Figura 5.13 mostra as curvas de pressão em função do tempo obtidas com as três malhas e com os dois métodos de advecção.

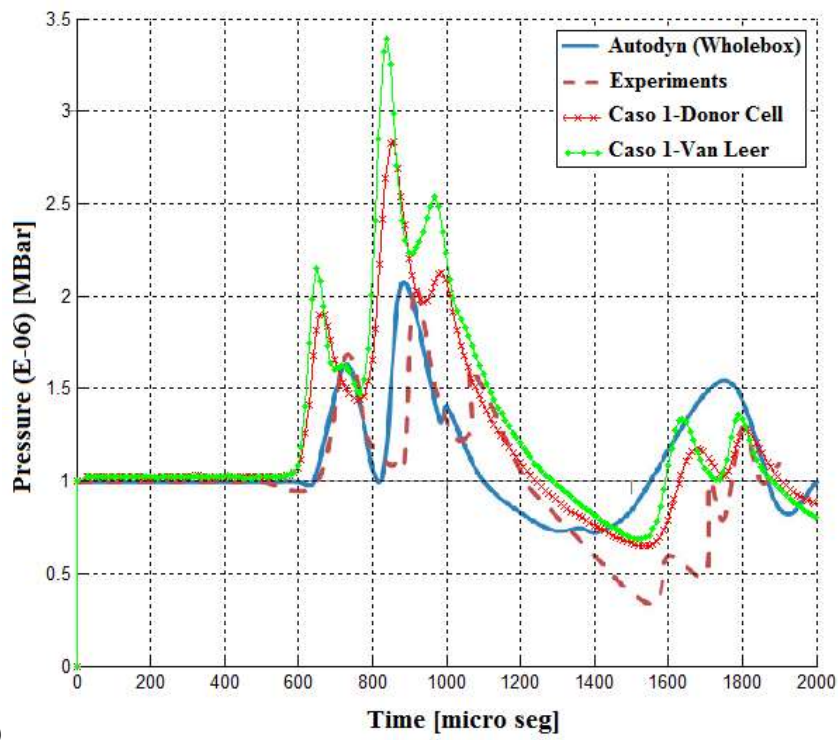
**Tabela 5.12** – Resultados obtidos com os métodos de advecção de Van Leer e Donor Cell para as três combinações de malhas 2D e 3D.

Caso	Tamanho dos elementos		Método de advecção	P [Mbar]	T [ $\mu$ s]	Tempo de simulação	
	2D	3D				2D [h.min.sec]	3D [h.min.sec]
1	0,02	0,625	Van Leer	3,392E-06	839	2.4.28	0.56.32
			Donor Cell	2,836E-06	849	1.31.30	0.49.19
2	0,04	1,25	Van Leer	2,569E-06	893	0.14.52	0.1.21
			Donor Cell	2,218E-06	899	0.10.33	0.0.16
3	0,08	2,5	Van Leer	2,141E-06	934	0.1.51	0.0.2
			Donor Cell	1,815E-06	947	0.1.25	0.0.1

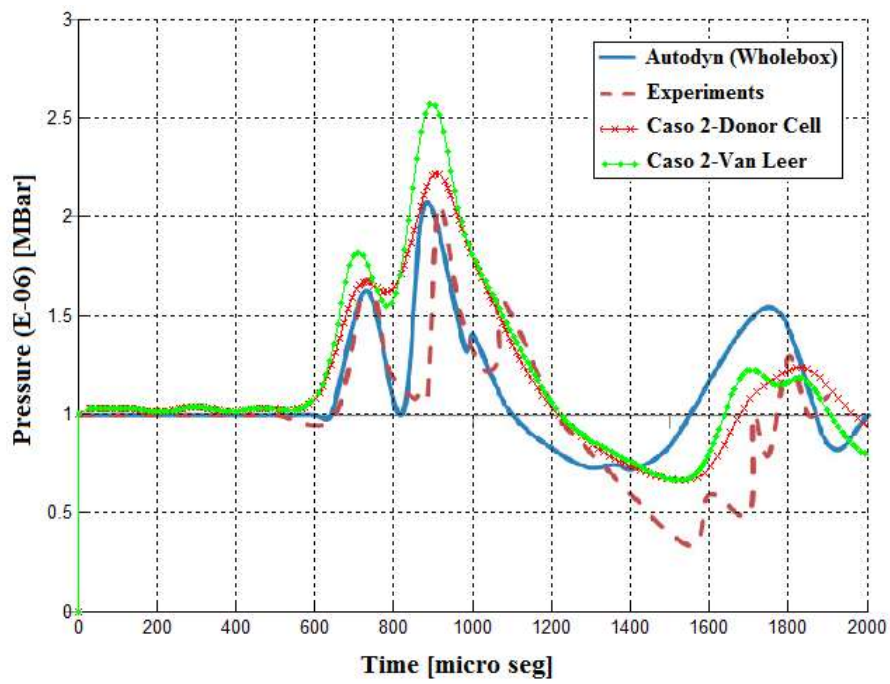


**Figura 5.13** – Curvas de pressão em função do tempo obtidos com os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell para as malhas de elementos finitos dos casos 1, 2 e 3 da Tabela 5.12.

Na Figura 5.14 compara-se as curvas de pressão experimental e numérico do trabalho de Hu [5] com as curvas de pressão obtidas com os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell para os casos 1, 2 e 3 da Tabela 5.12.

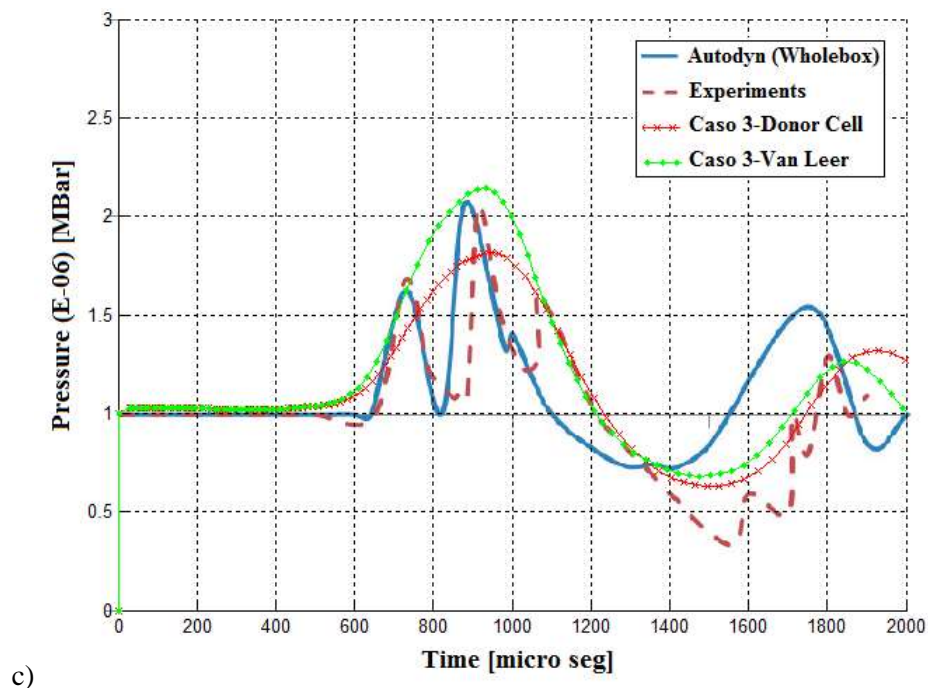


a)



b)





**Figura 5.14** – Comparação das curvas de pressão experimental e numérica do trabalho de Hu [5] com as curvas de pressão obtidas nos casos 1, 2 e 3 da Tabela 5.12: a) Caso 1; b) Caso 2; c) Caso 3.

Analisando os resultados obtidos (Tabela 5.12), pode-se observar que, como no exemplo da explosão ao ar livre (secção 5.1.1), também neste exemplo os resultados dependem da discretização da malha de elementos finitos e do método de advecção utilizado.

O pico máximo de pressão aumenta com o refinamento das malhas e o tempo de chegada diminui com refinamento das malhas, como se pode constatar na Tabela 5.12.

No trabalho de Hu [5] a explosão dentro da caixa fechada foi simulada utilizando o método de advecção de Van Leer. Neste trabalho, os dois métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell foram utilizados. Analisando os perfis das curvas de pressão, os picos das curvas de pressão e os tempos em que ocorrem os picos de pressão, na Figura 5.14, pode-se observar que os melhores resultados são os obtidos com o método de advecção de Donor Cell e com as malhas 2D e 3D com tamanhos de elementos iguais à 0.04 e 1.25 cm, respetivamente (Figura 5.14-b).

Tendo em conta os resultados obtidos com as malhas 2D e 3D com tamanhos de elementos iguais à 0.04 e 1.25 cm e com o método de advecção de Donor Cell, considerou-se aceitável a aproximação obtida para efeitos da calibração do hidrocódigo LS-DYNA, utilizando a metodologia ALE, em simular problemas de explosões em espaços confinados.

### 5.2.1.2 Simulação da explosão confinada utilizando a tecnologia do FSI

Nesta secção, a tecnologia do FSI descrita na secção 4.5. foi utilizada para reproduzir o exemplo da explosão do alto explosivo TNT na caixa fechada [5]. A vantagem de utilizar a técnica do FSI é que ela permite modelar a estrutura da caixa e utilizando um algoritmo de acoplamento permite transmitir as forças geradas na detonação do alto-explosivo à estrutura da caixa e por isso permite um modelo mais realista do problema. Esta técnica tem sido utilizada em muitos trabalhos envolvendo interação entre ondas de choque explosivas e estruturas [1], [37], [43]. No entanto, no caso particular das explosões confinadas, não se encontraram estudos utilizando esta tecnologia.

A modelação de um problema de interação fluido sólido (FSI) no LS-DYNA, como já se tinha referido na secção 4.5, requer a utilização de duas malhas: uma malha Lagrangiana para a estrutura e uma malha ALE para os fluidos (ar e gases gerados na detonação do explosivo, para o caso explosões). Neste estudo, a densidade da malha de elementos finitos foi investigada e dois casos utilizando malhas 3D com tamanhos de elementos diferentes foram consideradas (Tabela 5.13).

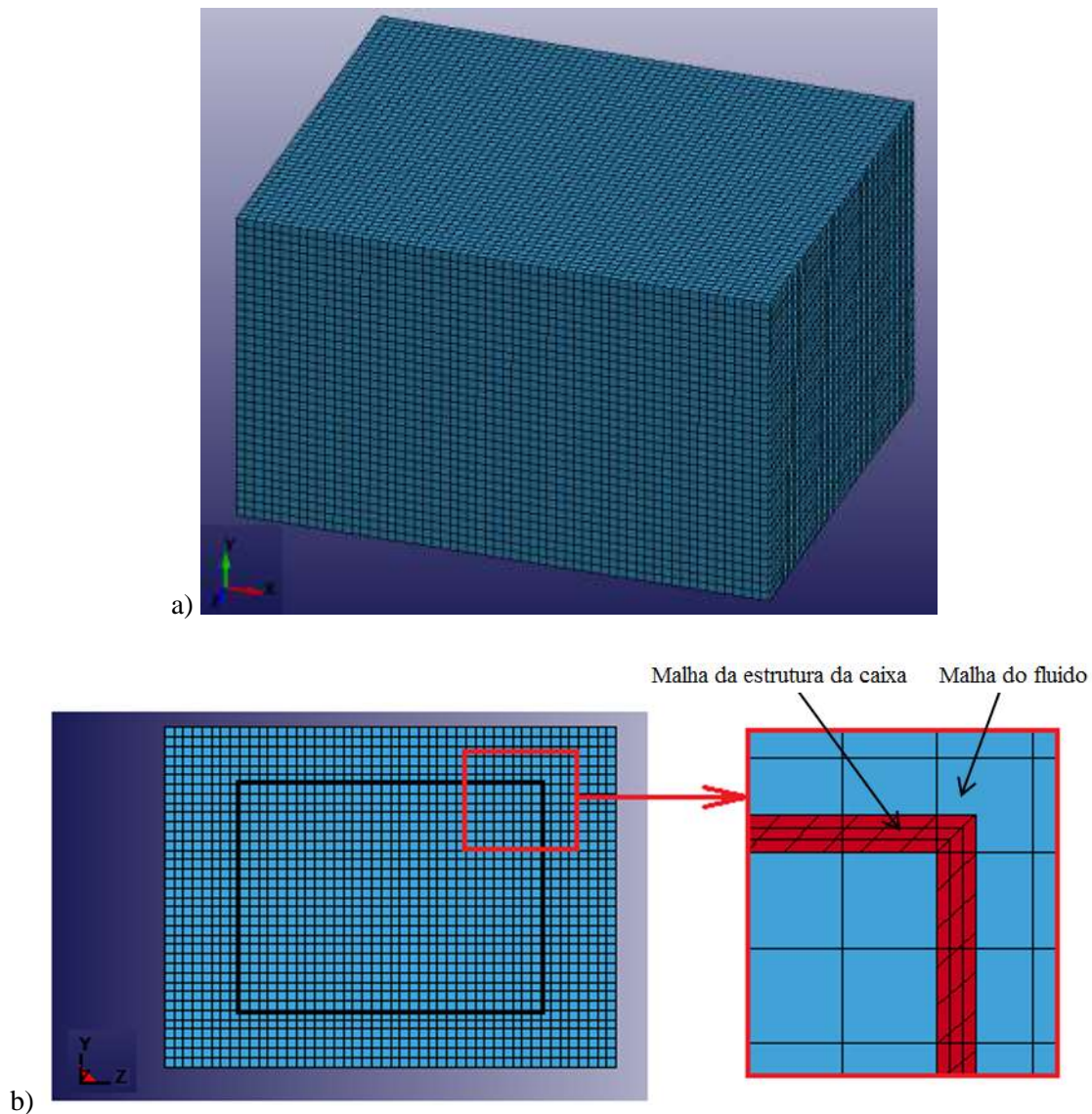
#### 5.2.1.2.1 Descrição das malhas de elementos finitos

As malhas da caixa foram construídas com elementos sólidos hexaedros não uniformes, enquanto que as malhas das massas fluidas foram construídas com elementos sólidos hexaedros uniformes. Na Tabela 5.13 estão apresentadas os dados relativamente aos elementos e dimensões das malhas de elementos finitos utilizadas neste problema. A Figura 5.15 ilustra essas malhas.

**Tabela 5.13** – Dimensões e tamanho dos elementos das malhas das massas fluidas e da estrutura.

Caso	Malha dos fluidos				Malha da estrutura	
	2D		3D		3D	
	*Dim. (x,y) [cm]	*a [cm]	Dim. (x,y,z) [cm]	a [cm]	Dim. (x,y,z,e) [cm]	*Nº elem. (x,y,z,e)
1	(25, 30)	0,04	(75,45,60)	1	(50,30,40,0.5)	(50,30,40,3)
2				0,5		(100,60,80,3)

\*Dim. – Dimensões da malha; \*a – Tamanho dos elementos; \*Nº elem. – Número de elementos; \*e – Espessura da malha da estrutura.



**Figura 5.15** – a) Malha numérica do ar e da caixa, b) Ilustração da malha da caixa contida dentro da malha das massas fluidas.

A técnica do *mapping* 2D para 3D foi utilizado neste estudo e a mesma malha 2D com tamanhos de elementos igual a 0.04 cm que produziu melhores resultados nas simulações da secção 5.2.1.1 foi utilizada.

#### 5.2.1.2.2 Definição do problema no LS-DYNA

Como já se tinha referido, a técnica do *mapping* foi utilizada neste exemplo. Dado que, as condições iniciais da detonação do TNT são iguais para ambos os casos das simulações da secção 5.2.1.1 e das simulações realizadas nesta secção, os dois ficheiros binários gerados com a malha 2D utilizando os dois métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell foram utilizados como condição inicial nos dois modelos 3D considerados neste exemplo.

As partes (\*PART) do explosivo, do ar e da estrutura foram definidas na malha de elementos finitos 3D. As mesmas equações de estados, modelos de materiais e tipo de elementos utilizadas para o ar e para o explosivo TNT nas simulações da secção 0 foram utilizadas nesta secção. A parte (\*PART) a que corresponde a malha da estrutura da caixa foi modelada com o modelo de material \*MAT\_RIGID e o com elementos Lagrangeanos (ELFORM = 1 em \*SECTION\_SOLID). A estrutura da caixa foi assumida como sendo de aço e os parâmetros utilizados para o modelo \*MAT\_RIGID foram retiradas da tese Webster [26]. Na Tabela 5.14 apresentam-se esses parâmetros.

**Tabela 5.14** – Os parâmetros do modelo de material do aço [26]

$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Módulo de Young [MBar]	Coef. Poisson
7.78	2.06	0.281

O método de acoplamento descrito na secção 4.5 foi utilizado neste problema para comunicar as forças geradas pela detonação do TNT à parede da estrutura da caixa. No LS-DYNA, este método de acoplamento é definido pela seleção da opção CTYPE = 4 em \*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID. É necessário definir o número de pontos de acoplamento entre a malha Lagrangeana e o fluido da malha ALE. Para malhas, Lagrangeana e ALE, com elementos de tamanho aproximadamente iguais, que é o caso deste problema, recomenda-se dois pontos de acoplamentos para cada elemento ALE (NQUAD = 2 (modo padrão) em \*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID) [50].

Nesta simulação, não foram utilizadas condições de fronteiras nas superfícies livres da malha do ar, pelo que, a opção *off* (EBC = 0 em \*CONTROL\_ALE) das condições de fronteiras de Euler foi utilizada para definir velocidade sem restrições para os nós nas superfícies livres da malha do ar.

A simulação no modelo 3D foi corrida de 30 à 2500  $\mu$ s (ENDTIM = 2500 em \*CONTROL\_TERMINATION).

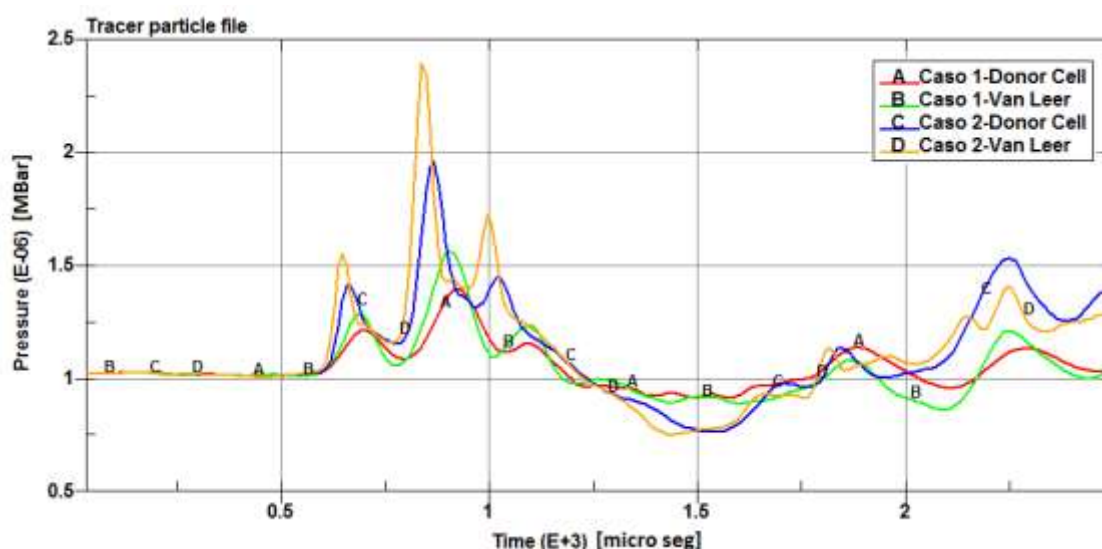
No ANEXO-F apresentam-se os comandos utilizados para modelar a explosão do TNT no interior da caixa fechada para um modelo 3D, utilizando a tecnologia do FSI no LS.DYNA.

### 5.2.1.2.3 Resultados

Na Tabela 5.15, apresentam-se os resultados da simulação da explosão do TNT no interior da caixa fechada utilizando a técnica do FSI. Estão apresentados os resultados obtidos com os dois métodos de advecção de Van Leer e Donor Cell. A Figura 5.16 mostra as curvas de pressão em função do tempo obtidas com as duas malhas e com os dois métodos de advecção.

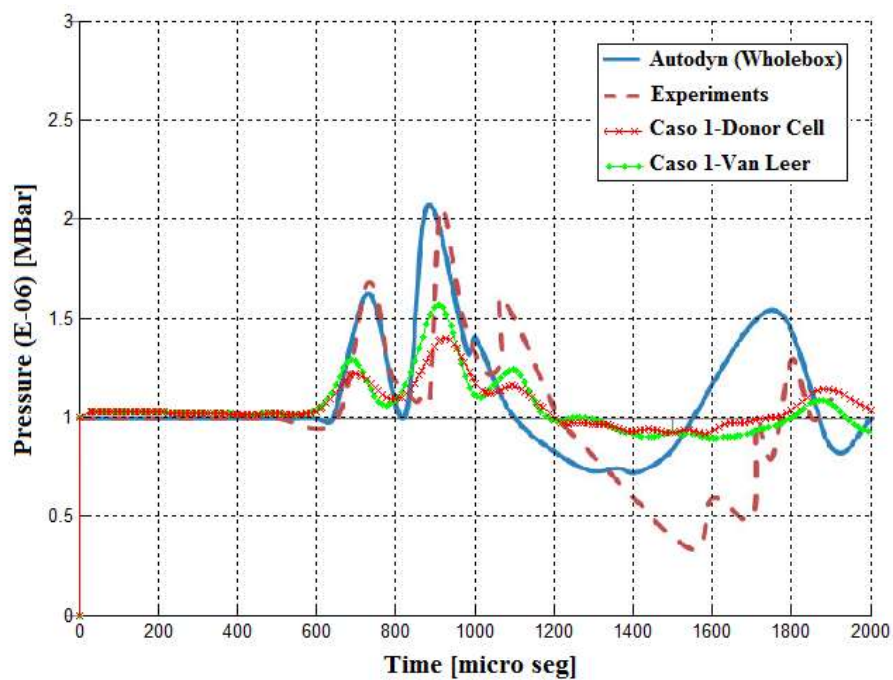
**Tabela 5.15** – Resultados obtidos cm os métodos de advecção de Van Leer e Donor Cell para as duas malhas 3D com tamanhos de elementos igual à 1.25 cm e 0.5 cm.

Caso	Método de advecção	P [MBar]	T [ $\mu$ s]	Duração [h.min.sec]	
				2D	3D
1	Van Leer	1.57E-6	908	0.17.7	0.8.49
	Donor Cell	1.40E-6	926	0.10.33	0.6.32
2	Van Leer	2.399E-6	839	0.17.7	1.50.4
	Donor Cell	1.965E-6	868	0.10.33	1.8.12

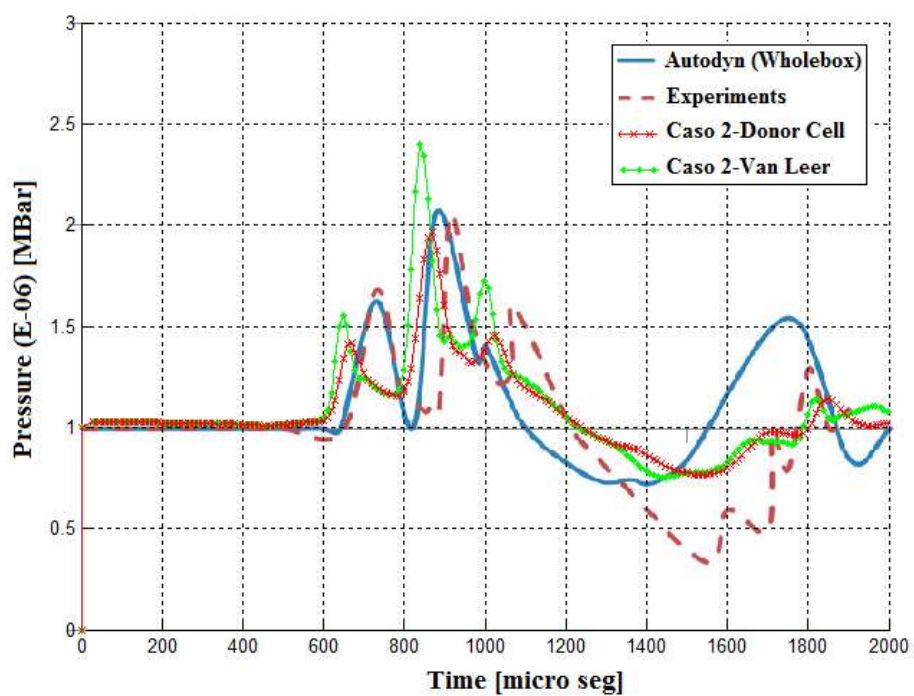


**Figura 5.16** – Curvas de pressão em função do tempo obtidos com os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell para as malhas de elementos finitos dos casos 1, 2 da Tabela 5.13.

Na Figura 5.17 compara-se as curvas de pressão experimental e numérico do trabalho de Hu [5] com as curvas de pressão obtidas com os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell para os casos 1 e 2 da Tabela 5.13.



a)



b)

**Figura 5.17** - Comparação das curvas de pressão experimental e numérico do trabalho de Hu [5] com as curvas de pressão obtidas com os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell nos casos 1, 2 da Tabela 5.13: a) Caso 1; b) Caso 2.

Também, nesta secção, a explosão dentro da caixa fechada foi simulada utilizando os dois métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell e também ao contrário do trabalho de Hu [5] onde os resultados foram obtidos com o método de advecção de Van Leer, nestas simulações, os melhores resultados foram conseguidos com o método de advecção de Donor Cell, como se pode observar na Figura 5.17-b onde estão apresentados os resultados obtidos com a malha 3D de tamanho de elementos igual à 0.5 cm e com os métodos de advecção de Van Leer e de Donor Cell.

Analisando a curva de pressão obtida com o método de advecção de Donor Cell e com a malha 3D de tamanho de elementos igual a 0.5 cm na Figura 5.17-b, pode-se observar que esta é semelhante as curvas de pressão numérica e experimental do trabalho de Hu [5]. Tendo isto, o modelo numérico com tamanhos de elementos iguais à 0.04 e 0.5 cm nas malhas 2D e 3D, respetivamente, e utilizando o método de advecção de Donor Cell, foi considerado adequado para simular a detonação de um alto-explosivo dentro de um espaço confinado e será utilizado no estudo paramétrico para investigar as explosões confinadas da presente tese.

## Capítulo 6 Estudo paramétrico

Neste capítulo, o modelo numérico calibrado na secção 5.2.1.2 será utilizado para conduzir um estudo paramétrico para investigar as características de uma explosão totalmente confinada e posteriormente determinar uma relação fenomenológica que permita prever as pressões máximas geradas dentro de um compartimento confinado.

### 6.1 Características de um carregamento confinado dentro de um compartimento fechado

Nesta secção foram investigadas as características de um carregamento confinado dentro de um compartimento fechado. No âmbito desse estudo, foram consideradas cinco compartimentos com dimensões típicas de compartimentos de pequenos navios. Os cinco compartimentos possuem geometrias prismáticas retangulares com o mesmo volume e mesma dimensão na direção y (altura). As dimensões nas direções x e z (comprimento e largura) foram sendo variadas. Neste estudo, considerou-se a explosão de uma massa de 40 g de TNT dentro dos cinco compartimentos e admitiu-se que o explosivo TNT se encontrava posicionado no centro de cada compartimento. Foi investigada a relação entre a pressão máxima obtida e alguns parâmetros do modelo, nomeadamente o quociente entre as dimensões x e z ( $x/z$ ) dos compartimentos, a distância entre o ponto de detonação e o sensor. A distribuição de pressão dentro dos compartimentos também foi investigada e comparada com resultados do manual da UFC [6]. Os dados relativamente às dimensões dos cinco compartimentos considerados neste trabalho estão apresentados na Tabela 6.1.

**Tabela 6.1** – Dados relativamente as dimensões dos cinco compartimentos e massa do explosivo.

Modelos reais						
Direções	Compartimentos					Volume [cm <sup>3</sup> ]
	1	2	3	4	5	
x [cm]	240	300	360	420	480	13824000
y [cm]	240	240	240	240	240	
z [cm]	240	192	160	137	120	
						40



### 6.1.1 Modelação numérica

A simulação numérica de problemas de explosões requer a utilização de malhas com elementos muito pequenos (na ordem dos mm para a uma malha 2D e na ordem dos cm para uma malha 3D, quando se utiliza a técnica do *mapping*), pelo que simular as explosões dentro dos cinco compartimentos com as dimensões reais seria um processo moroso devido aos tempos de simulação elevadíssimos. Em alternativa, a lei de escala de Hopkinson e Cranz (descrita na secção 2.5) foi utilizada. De acordo com esta lei, utilizando um fator de escala, pode-se converter o modelo real num modelo mais pequeno e as propriedades da onda de choque (consultar Tabela 2.1 para ver essas propriedades) do modelo real podem ser estimadas a partir das propriedades da onda de choque gerada no modelo mais pequeno através das relações entre essas propriedades e o fator de escala (Tabela 2.1).

Neste trabalho, utilizando um fator de escala,  $\lambda = 0.25$ , os modelos reais dos cinco compartimentos e o explosivo foram convertidos em modelos numéricos mais pequenos. Na Tabela 6.2 estão descritas as dimensões dos compartimentos e a massa do explosivo para um fator de escala de  $\lambda = 0.25$ .

**Tabela 6.2** – Dimensões dos modelos dos cinco compartimentos e massa do explosivo para um fator de escala de  $\lambda = 0.25$ .

Modelos numéricos								
Direções	Compartimentos					Massa do explosivo [g]	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Fator de escala, $\lambda$
	1	2	3	4	5			
X [cm]	60	75	90	105	120	0,625	216000	0,25
Y [cm]	60	60	60	60	60			
Z [cm]	60	48	40	48	30			

A técnica do *mapping* foi utilizada neste trabalho. Para todos os casos (detonação do alto-explosivo TNT nos compartimentos 1, 2, 3, 4 e 5) foi utilizada a mesma malha 2D. Uma vez que as condições iniciais da detonação do alto explosivo TNT são iguais para todos os cinco casos, o ficheiro binário gerado na simulação da detonação do alto-explosivo TNT no modelo 2D foi utilizado para todos os cinco casos, permitindo desta forma obter alguma economia no tempo computacional.

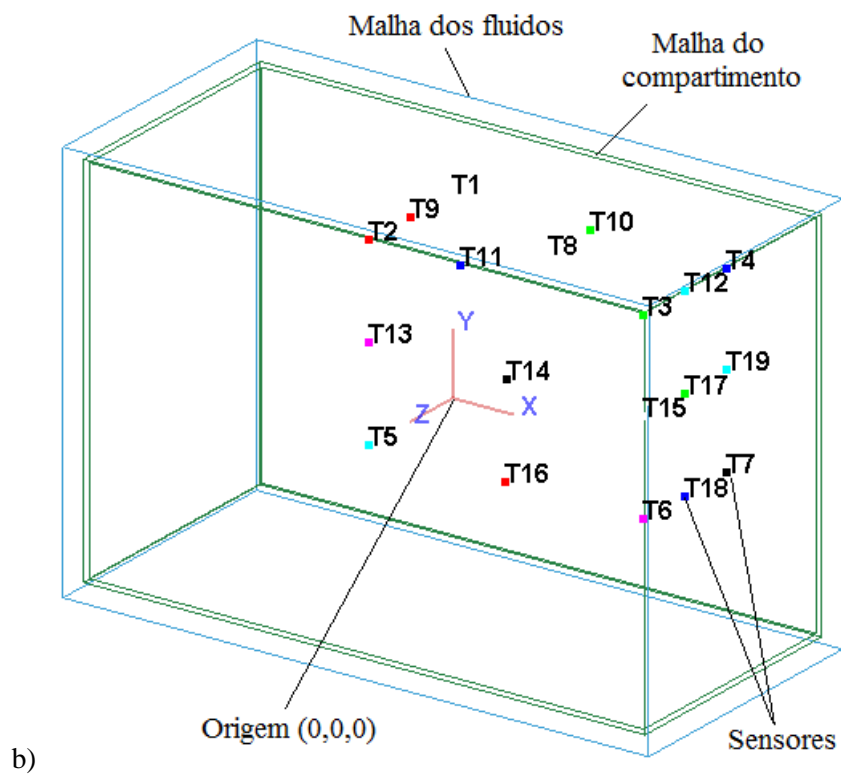
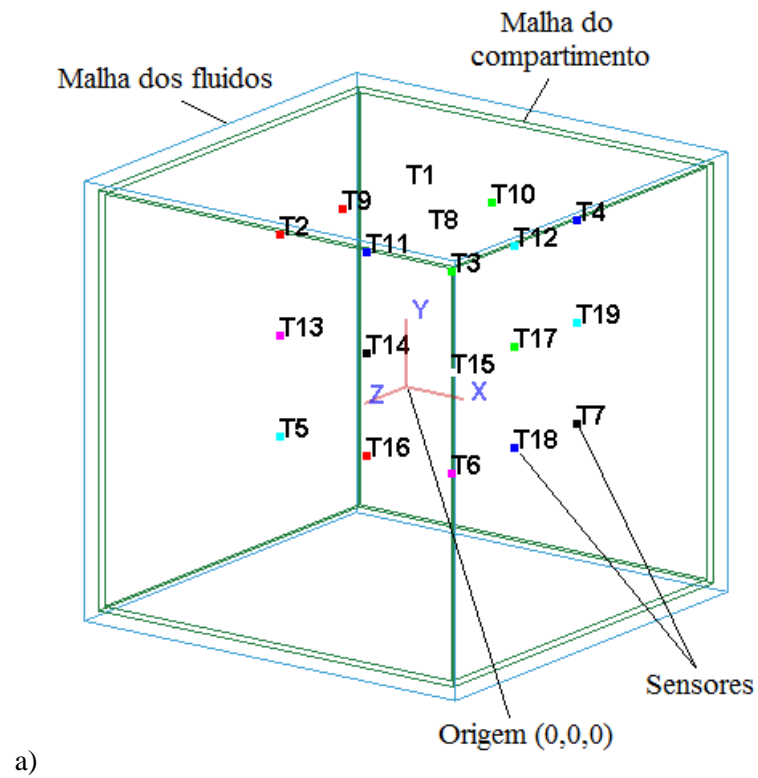
As malhas das estruturas dos modelos numéricos dos compartimentos foram geradas no programa de elementos finitos, ANSYS. A malha 2D e as malhas 3D para o fluido (gases gerados na detonação do explosivo) foram geradas no LS-PrePost. Os dados relativos às dimensões e tamanhos dos elementos para as malhas dos compartimentos e dos fluidos estão apresentados na Tabela 6.3.

**Tabela 6.3** – Dimensões e tamanhos de elementos para as malhas 2D e 3D dos fluidos e dimensões e número de elementos para as malhas dos cinco compartimentos.

Caso	Malhas do fluido				Malha do compartimento	
	2D		3D		3D	
	*D (x, y) [cm]	*a [cm]	D (x, y, z) [cm]	*Ele. (x, y, z)	D (x, y, z, *e) [cm]	Ele. (x, y, z, e)
1			64;64;64	128;128;128	60;60;60;0,5	120;120;120;3
2			80;65;53	160;130;106	75;60;48;0,5	150;120;96;3
3	25; 30	0,04	95;65;45	190;130;90	90;60;40;0,5	180;120;80;3
4			110;65;39	220;130;78	105;60;34;0,5	210;120;68;3
5			125;65;35	250;130;70	120;60;30;0,5	240;120;60;3

\*D – dimensões da malha; \*a – Tamanho dos elementos; \*Ele. – Número de elementos; \*e – Espessura da malha da estrutura.

Para registrar as pressões geradas dentro dos cinco modelos numéricos dos compartimentos, dezanove sensores foram utilizados para cada modelo. Os sensores foram colocados à 5 mm de distância das paredes das estruturas. A distribuição dos sensores é igual para todos os cinco compartimentos. A Figura 6.1 ilustra o posicionamento dos dezanove sensores para os compartimentos 1 e 3, que demonstram como os sensores estão distribuídos nos cinco compartimentos. As posições dos dezanove sensores para os compartimentos 1, 2, 3, 4 e 5 estão apresentados na Tabela 6.4, Tabela 6.5, Tabela 6.6, Tabela 6.7 e Tabela 6.8, respetivamente.



**Figura 6.1** – Localização dos sensores nos modelos numéricos dos compartimentos. a) Compartimento 1; b) Compartimento 3.

**Tabela 6.4** – Posição dos 19 sensores para o compartimento-1.

Sensores	Posição dos sensores caixa-1 [cm]		
	x	y	z
1	0	29,5	0
2	0	29,5	29,5
3	29,5	29,5	29,5
4	29,5	29,5	0
5	0	0	29,5
6	29,5	0	29,5
7	29,5	0	0
8	14,75	29,5	14,75
9	0	29,5	14,75
10	14,75	29,5	0
11	14,75	29,5	29,5
12	29,5	29,5	14,75
13	0	14,75	29,5
14	14,75	14,75	29,5
15	29,5	14,75	29,5
16	14,75	0	29,5
17	29,5	14,75	14,75
18	29,5	0	14,75
19	29,5	14,75	0

**Tabela 6.5** – Posição dos 19 sensores para a compartimento-2.

Sensores	Posição dos sensores caixa-2 [cm]		
	x	y	z
1	0	29,5	0
2	0	29,5	23,5
3	37	29,5	23,5
4	37	29,5	0
5	0	0	23,5
6	37	0	23,5
7	37	0	0
8	18,5	29,5	11,75
9	0	29,5	11,75
10	18,5	29,5	0
11	18,5	29,5	23,5
12	37	29,5	11,75
13	0	14,75	23,5
14	18,5	14,75	23,5
15	37	14,75	23,5
16	18,5	0	23,5
17	37	14,75	11,75
18	37	0	11,75
19	37	14,75	0

**Tabela 6.6** – Posição dos 19 sensores para a compartimento-3.

Sensores	Posição dos sensores caixa-3 [cm]		
	x	y	z
1	0	29,5	0
2	0	29,5	19,5
3	44,5	29,5	19,5
4	44,5	29,5	0
5	0	0	19,5
6	44,5	0	19,5
7	44,5	0	0
8	22,25	29,5	9,75
9	0	29,5	9,75
10	22,25	29,5	0
11	22,25	29,5	19,5
12	44,5	29,5	9,75
13	0	14,75	19,5
14	22,25	14,75	19,5
15	44,5	14,75	19,5
16	22,25	0	19,5
17	44,5	14,75	9,75
18	44,5	0	9,75
19	44,5	14,75	0

**Tabela 6.7** – Posição dos 19 sensores para a compartimento-4.

Sensores	Posição dos sensores caixa-4 [cm]		
	x	y	z
1	0	29,5	0
2	0	29,5	16,5
3	52	29,5	16,5
4	52	29,5	0
5	0	0	16,5
6	52	0	16,5
7	52	0	0
8	26	29,5	8,25
9	0	29,5	8,25
10	26	29,5	0
11	26	29,5	16,5
12	52	29,5	8,25
13	0	14,75	16,5
14	26	14,75	16,5
15	52	14,75	16,5
16	26	0	16,5
17	52	14,75	8,25
18	52	0	8,25
19	52	14,75	0

**Tabela 6.8** – Posição dos 19 sensores para a compartimento-5.

Sensores	Posição dos sensores caixa-5 [cm]		
	x	y	z
1	0	29,5	0
2	0	29,5	14,5
3	59,5	29,5	14,5
4	59,5	29,5	0
5	0	0	14,5
6	59,5	0	14,5
7	59,5	0	0
8	29,75	29,5	7,25
9	0	29,5	7,25
10	29,75	29,5	0
11	29,75	29,5	14,5
12	59,5	29,5	7,25
13	0	14,75	14,5
14	29,75	14,75	14,5
15	59,5	14,75	14,5
16	29,75	0	14,5
17	59,5	14,75	7,25
18	59,5	0	7,25
19	59,5	14,75	0

### 6.1.2 Apresentação e análise dos resultados

Os resultados das pressões máximas registados nos dezanove sensores, obtidas após a simulação da detonação do TNT dentro dos cinco compartimentos, estão apresentados no ANEXO-G.

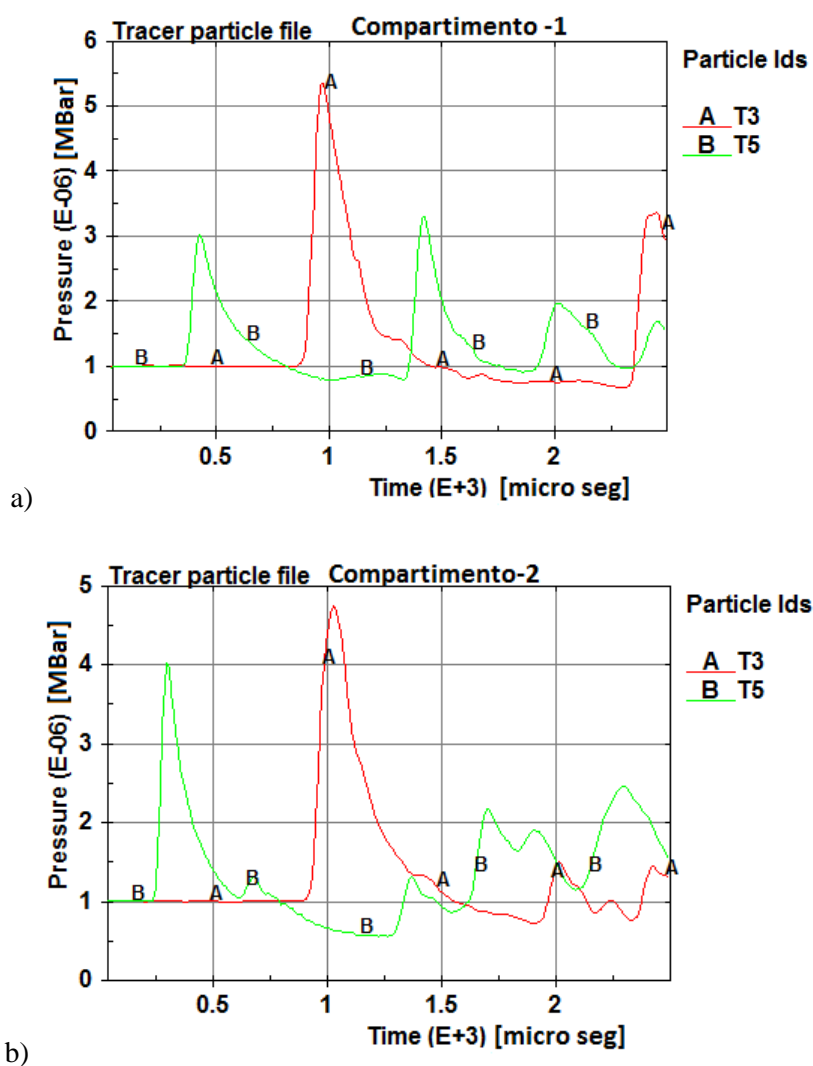
As pressões máximas registadas nos compartimentos 1, 2, 3, 4 e 5 estão apresentados na Tabela 6.9, bem como os tempos em que ocorreram essas pressões, a relação x/z dos compartimentos e a distância entre o ponto de detonação do explosivo e o sensor onde foi registada a pressão máxima.

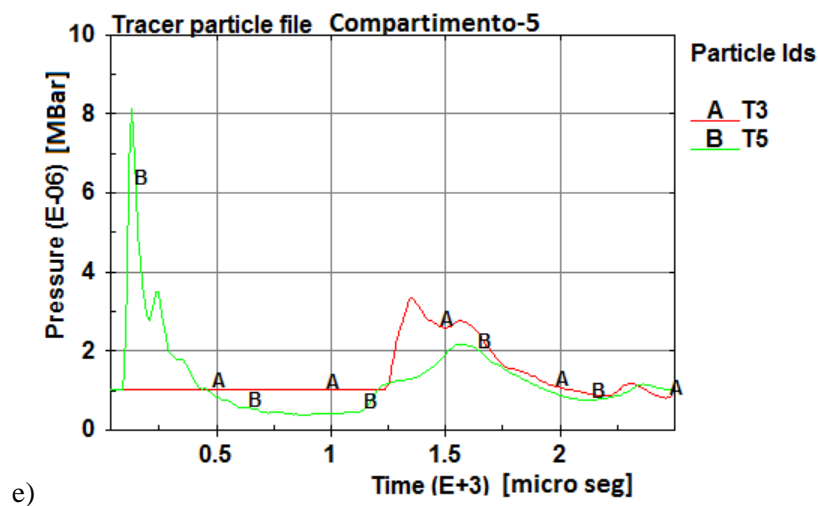
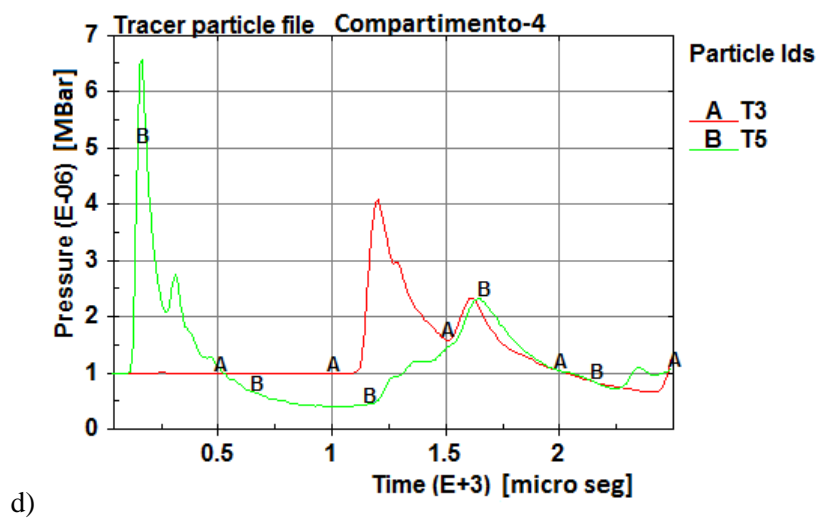
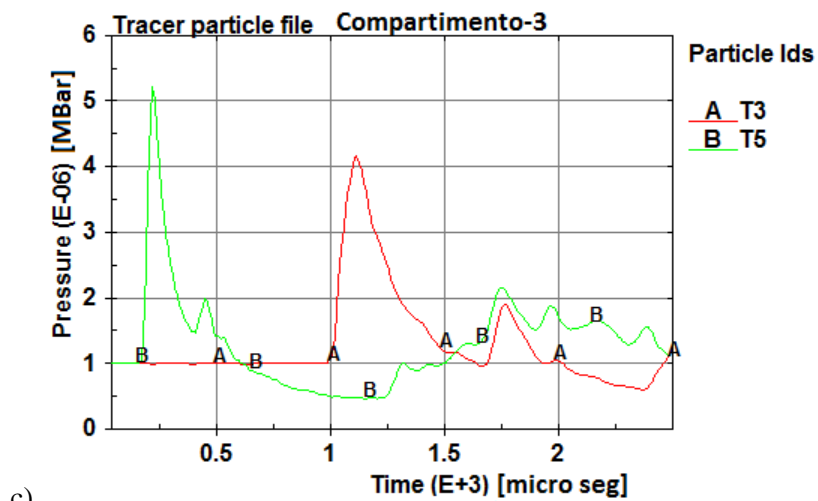
**Tabela 6.9** – Resultados das máximas pressões registradas nos compartimentos 1, 2, 3, 4 e 5, o tempo em que ocorre essas pressões, a relação x/z dos compartimentos e distância entre o ponto de detonação do explosivo e o sensor onde foi registrada a pressão máxima para cada compartimento.

Compartimento	Sensor	d* [cm]	x/z	Pressão [Mbar]	Tempo [ $\mu$ s]
1	3	51,1	1	5,38E-06	978
2	3	52,83	1,56	4,76E-06	1030
3	5	19,5	2,25	5,24E-06	219
4	5	16,5	3,09	6,61E-06	170
5	5	14,5	4	8,14E-06	130

d\* – Distância do centro do explosivo a um sensor.

Analisando as pressões máximas ocorridas nos cinco compartimentos (Tabela 6.9) pode-se observar que, nos compartimentos 1 e 2, as pressões máximas foram registradas no sensor 3 e nos compartimentos 3, 4, e 5 as pressões máximas foram registradas no sensor 5. A Figura 6.2 compara as pressões registradas nos sensores 3 e 5 para cada compartimento.





**Figura 6.2** – Comparação das curvas de pressão em função do tempo dos sensores 3 e 5 para os cinco compartimentos: a) compartimento 1, b) Compartimento 2; c) compartimento 3; d) Compartimento 4; e) Compartimento 5;



Sabe-se da secção 2.4 que para uma explosão ao ar livre quanto mais próximo estiver um ponto do centro de detonação do explosivo, maior será a pressão (a pressão decai à medida que a onda de pressão expande no meio circundante), no entanto, numa explosão confinada, nem sempre este fenómeno se verifica, pois a intensidade da onda de pressão pode ser amplificada com as reflexões sofridas pela mesma nas paredes do compartimento [4]–[6]. Nos compartimentos 1 e 2, embora o sensor 5 estivesse mais próximo do ponto de detonação do explosivo, as máximas pressões foram registadas no sensor 3 (Figura 6.2-a e Figura 6.2-b). Isto deveu-se às reflexões das ondas de pressão nas paredes laterais e no teto da estrutura dos compartimentos 1 e 2 que fizeram com que a intensidade da pressão aumentasse na região onde se localizava o sensor 3, para cada compartimento. Este reforço deve-se às interações entre as diversas ondas refletidas que podem reforçar-se ou anular-se consoante a sua direção e sentido.

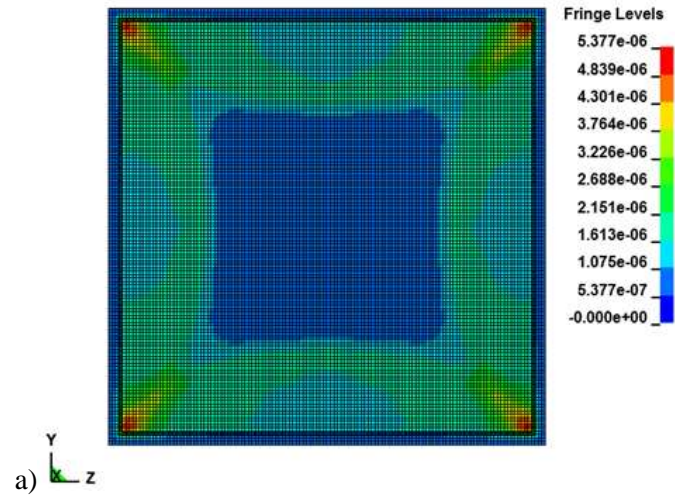
Contudo, para os compartimentos 3, 4 e 5 as pressões máximas foram registadas no sensor 5 (Figura 6.2-c, Figura 6.2-d e Figura 6.2-e). À medida que se foi aumentando a razão  $x/z$  entre os compartimentos, a distância entre o sensor 5 e o ponto de detonação do explosivo foi diminuindo e consequentemente, a distância entre o sensor 3 e o ponto de detonação do explosivo foi aumentando, para cada compartimento. Isto fez com que as reflexões nas paredes laterais e no teto na zona do sensor 3 se tornassem menos predominantes e as pressões na zona dos sensores 5 mais intensas. Esta é a razão das pressões máximas terem sido registadas nos compartimentos 3, 4 e 5.

Pode-se observar ainda na Figura 6.2 que múltiplos picos de pressão são registados pelos sensores 3 e 5 nos cinco compartimentos. No entanto, o manual da UFC [6] simplifica os múltiplos picos de pressão que ocorrem devido às reflexões das ondas de pressão por um único pico de pressão [5], [52].

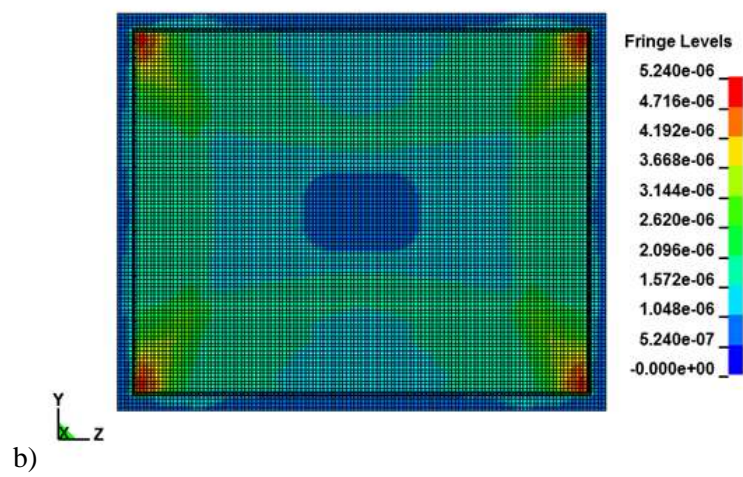
A Figura 6.3 ilustra a propagação da onda de pressão para os compartimentos 1, 2, 3, 4 e 5 nos instantes em que foram registadas as pressões máximas nos sensores 3 e 5. Como se pode ver na Figura 6.3-a e Figura 6.3-b há múltiplas reflexões nas paredes laterais dos respetivos compartimentos.

Nota-se que, os valores das pressões ilustradas na Figura 6.3 são ligeiramente diferentes das pressões registadas nos sensores 3 e 5 dos compartimentos 1, 2, 3, 4 e 5, isto é devido aos sensores terem sido posicionados à 5 mm das paredes e as pressões ilustradas na Figura 6.3 ocorrerem junto às paredes.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Time = 978.45  
Contours of Pressure  
min=-0, at elem# 855103  
max=5.37651e-06, at elem# 340485



LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost  
Time = 1029.9  
Contours of Pressure  
min=-0, at elem# 916395  
max=5.23963e-06, at elem# 409926



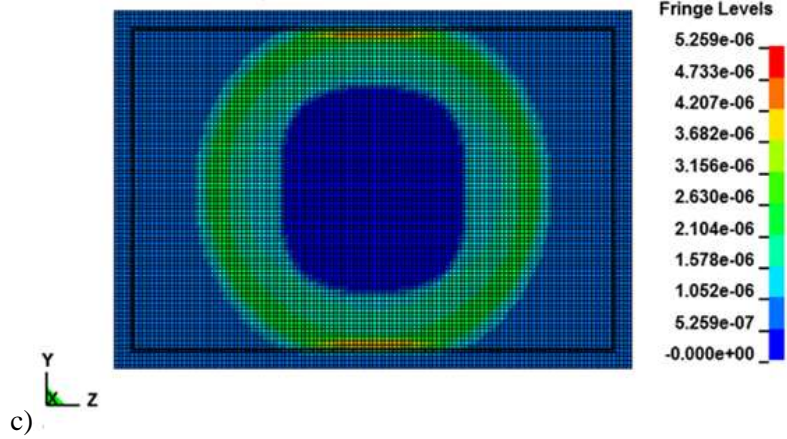
# LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time = 219.04

Contours of Pressure

min = -0, at elem# 827925

max = 5.25937e-06, at elem# 409355



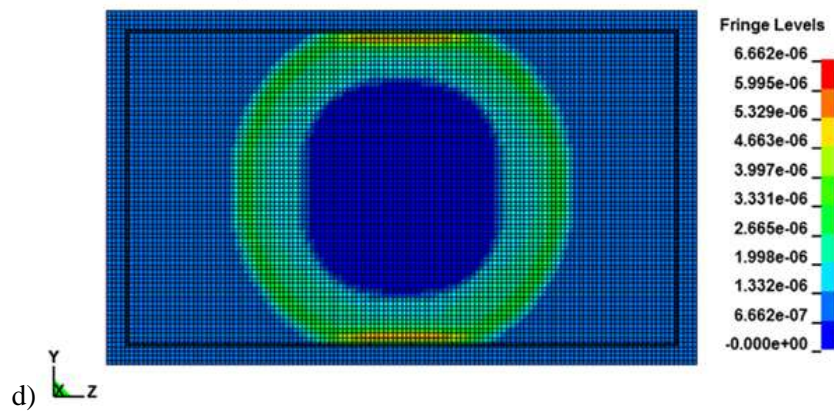
# LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

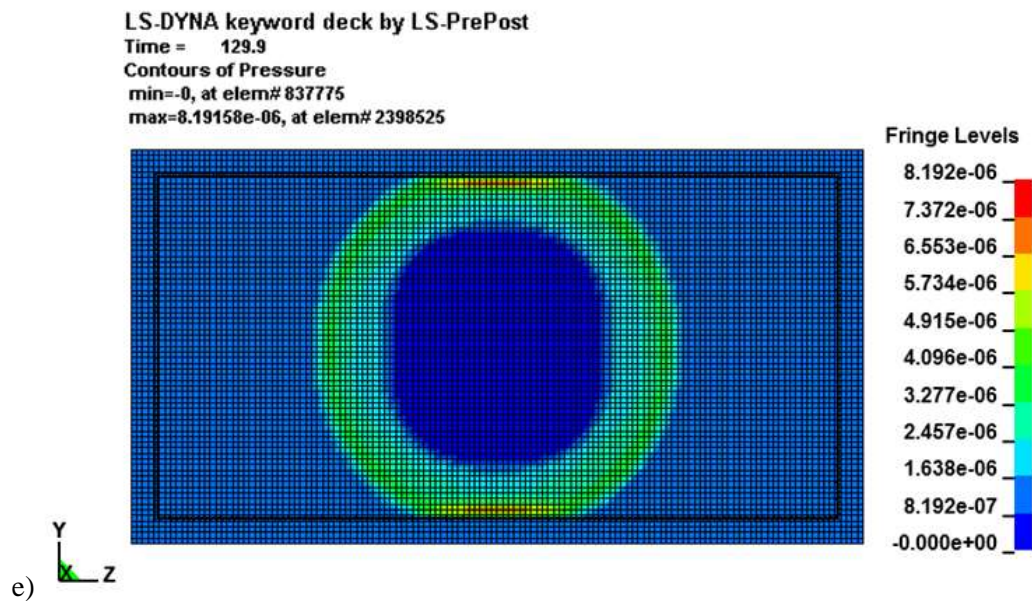
Time = 169.77

Contours of Pressure

min = -0, at elem# 813730

max = 6.66165e-06, at elem# 2360115

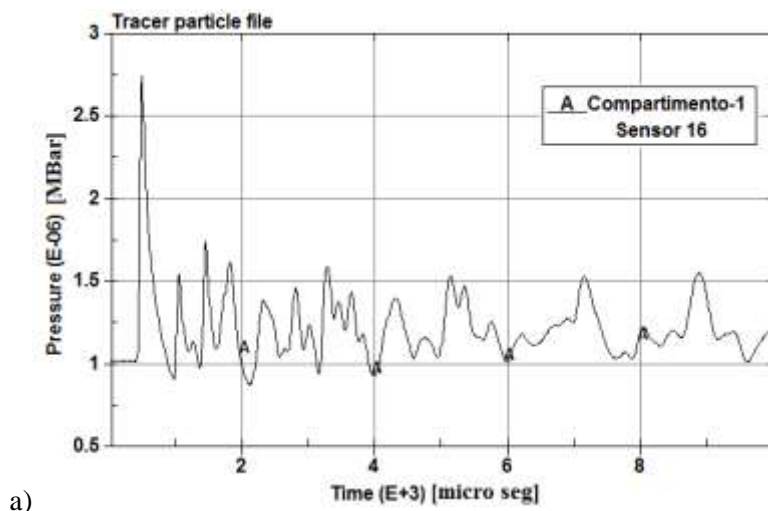


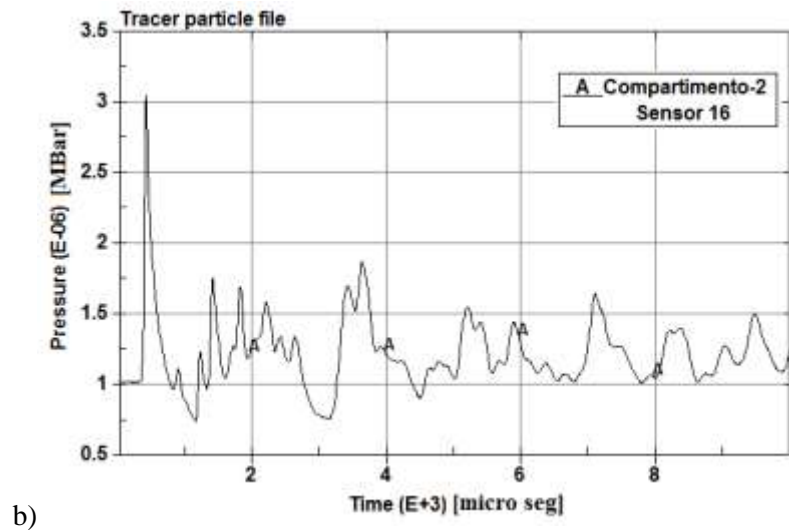


**Figura 6.3** – Distribuição de pressão nas zonas dos sensores 3 e 5. a) Distribuição de pressão no compartimento-1 para o instante  $t = 978 \mu\text{s}$ ; b) Distribuição de pressão no compartimento-2 para o instante  $t = 1030 \mu\text{s}$ ; c) Distribuição de pressão no compartimento-3 para o instante  $t = 219 \mu\text{s}$ ; d) Distribuição de pressão no compartimento-4 para o instante  $t = 170 \mu\text{s}$ ; e) Distribuição de pressão no compartimento-5 para o instante  $t = 130 \mu\text{s}$ .

### 6.1.2.1 Sobrepressão quase-estática

Numa explosão totalmente confinada, a pressão gerada tende, após um certo período de tempo, para uma sobrepressão (pressão maior que a atmosférica) estática e permanente, causado pelos produtos gerados na detonação do explosivo, pois não existem aberturas para libertar essa sobrepressão [5]. Neste trabalho, este fenómeno pode ser observado na Figura 6.4 onde se considerou a simulação da detonação do TNT dentro dos compartimentos 1 e 2 para um período de tempo de  $10000 \mu\text{s}$ .





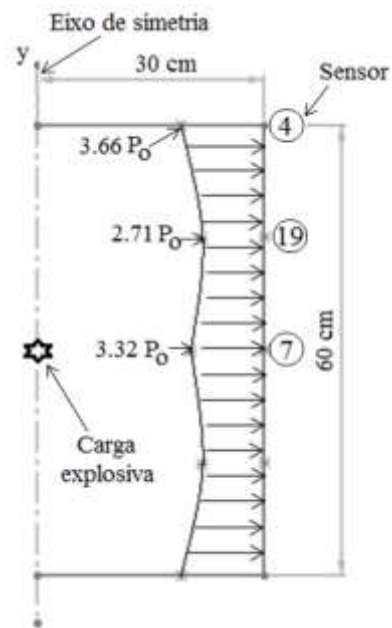
**Figura 6.4** – Pressão quase-estática. a) Compartimento-1 sensor 16; b) Compartimento-2 sensor 16.

### 6.1.2.2 Distribuição da pressão nos compartimentos

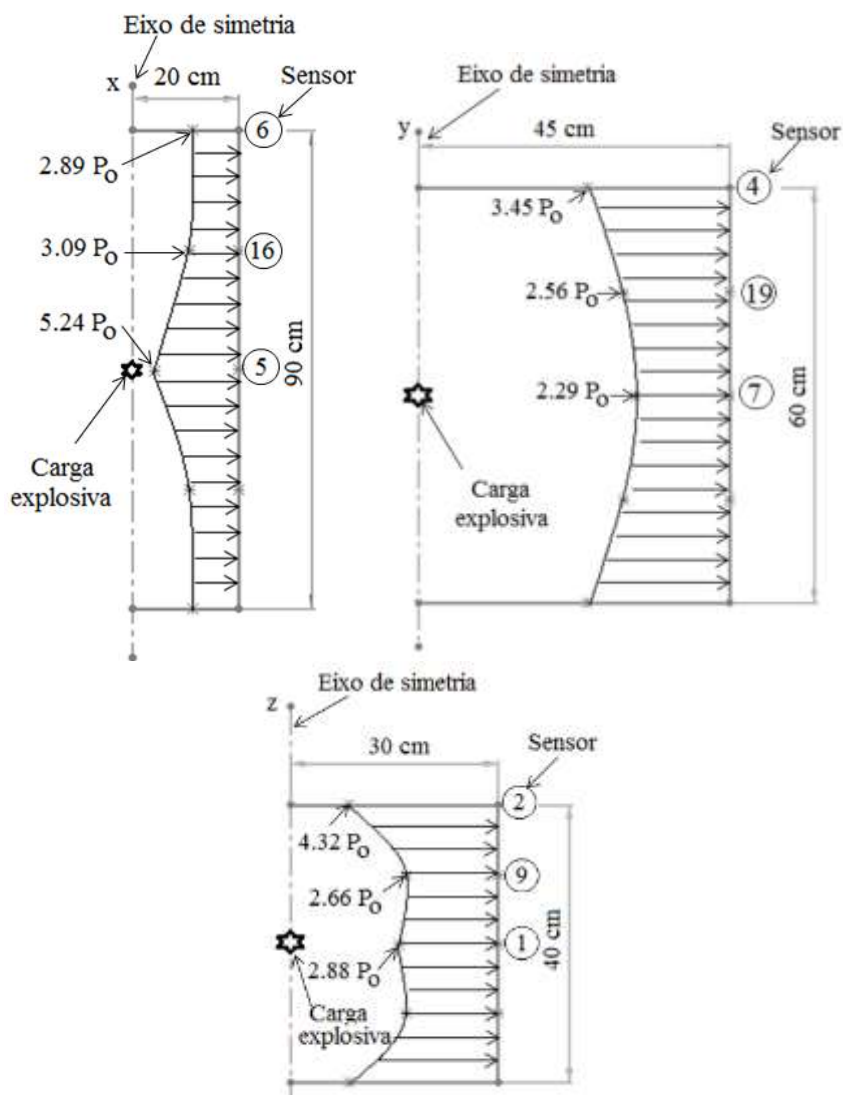
O manual da UFC [6] assume que a distribuição da pressão num compartimento confinado é uniforme, poucos trabalhos, demonstraram a possibilidade de a intensidade da onda de pressão aumentar nos cantos de um compartimento fechado [4], [5]. A Figura 6.5 apresenta a distribuição das pressões nos compartimentos 1, 3 e 5 para as linhas de centro dos planos, lateral (plano x), superior (plano y) e de frente (plano z). Nota-se que na Figura 6.5  $P_0$  é a pressão atmosférica.

Como se pode observar na Figura 6.5, a distribuição de pressão é não uniforme, indicando que a hipótese da distribuição de pressão uniforme num compartimento confinado, assumida pelo manual da UFC, pode produzir resultados errados.

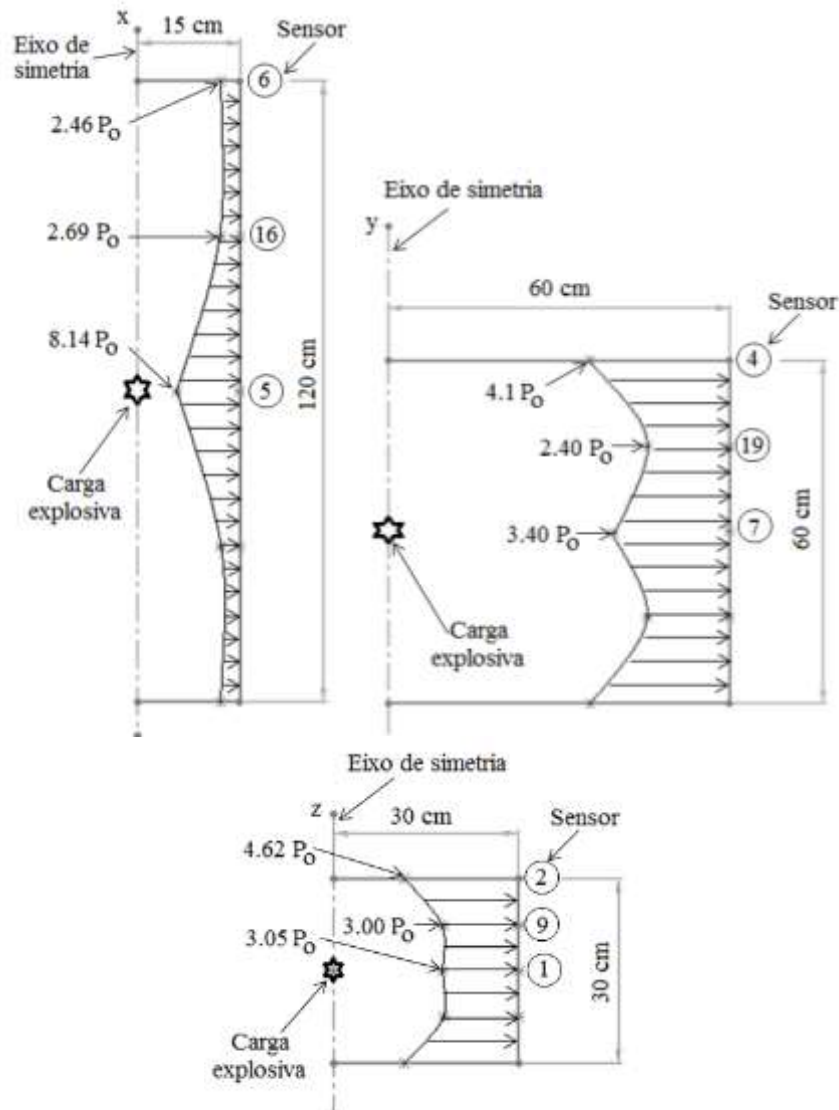




a)



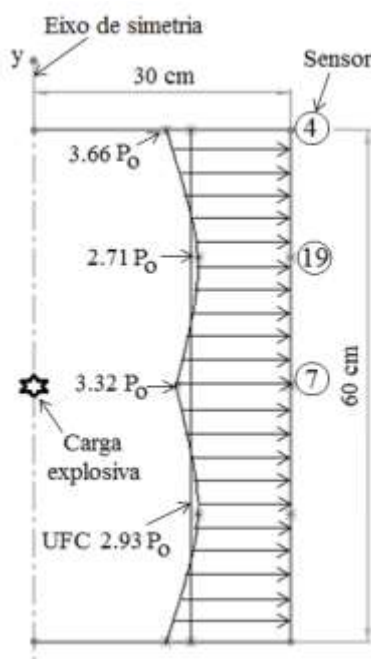
b)



c)

**Figura 6.5** – Distribuição das pressões nos compartimentos 1, 3 e 5 para as linhas de centro dos planos, superior, lateral e de frente: a) Distribuição de pressão na linha de centro do plano lateral (plano x) do compartimento 1; b) Distribuição de pressão nas linhas de centro dos planos, superior (plano y), lateral (plano x) e de frente (plano z) do compartimento 3; c) Distribuição de pressão nas linhas de centro dos planos, superior (plano y), lateral (plano x) e de frente (plano z) do compartimento 5.

Na Figura 6.6 compara-se a distribuição da pressão nas linhas de centro dos planos laterais, inferior ou superior e de frente ou trás do compartimento 1 com a distribuição de pressão prevista com o manual da UFC [6]. Nota-se que como o compartimento 1 é de geometria cúbica, logo, a distribuição de pressão para os planos laterais, inferior ou superior e de frente ou trás é igual para todos. O procedimento para utilizar o manual da UFC [6] para prever as pressões dentro de um compartimento confinado está descrito no ANEXO-H. Pode-se observar na Figura 6.6 que o manual da UFC subestima os valores da pressão para os sensores 4 e 7 e sobrestima o valor da pressão para o sensor 19, demonstrando a necessidade de investigar a distribuição em compartimentos fechados.



**Figura 6.6** – Comparação da distribuição da pressão nas linhas de centro dos planos laterais, inferior ou superior e de frente ou trás do compartimento 1 com a distribuição de pressão prevista com o manual da UFC [6].

### 6.1.2.3 Análise dos efeitos da relação $x/z$ dos compartimentos e da distância entre o centro do explosivo e um sensor.

O manual da UFC [6] utiliza um método misto baseado em métodos analíticos e resultados experimentais para determinar as pressões no interior de um compartimento confinado. Os parâmetros que o manual da UFC [6] considera para determinar a pressão dentro do interior do compartimento confinado são: a dimensão e a configuração da estrutura confinada, a massa do explosivo e a posição do explosivo. No entanto, não se demonstra qual o efeito causado na pressão pela variação da relação  $x/z$  (comprimento sobre largura) dos compartimentos. Os trabalhos de Hu [5] e de Wu [4] também não investigam esse parâmetro.

Na presente tese, o efeito da variação da relação  $x/z$  dos compartimentos e da distância entre o ponto de detonação do explosivo e um ponto de interesse, na pressão no ponto de interesse foram caracterizados. Realizaram-se duas análises estatísticas recorrendo ao método de regressão linear simples: Na primeira, analisou-se o efeito da variação da relação  $x/z$  dos compartimentos na pressão nos sensores 3 e 5 dos compartimentos, na segunda, analisou-se o efeito da variação da distância entre o ponto de detonação do explosivo e os sensores 3 e 5, na pressão nos respectivos sensores.



Na Tabela 6.10 estão descritas as pressões registadas nos sensores 3 e 5 para os cinco compartimentos, os valores da relação x/z dos compartimentos e as distâncias entre o centro do explosivo e os sensores 3 e 5 para cada compartimento.

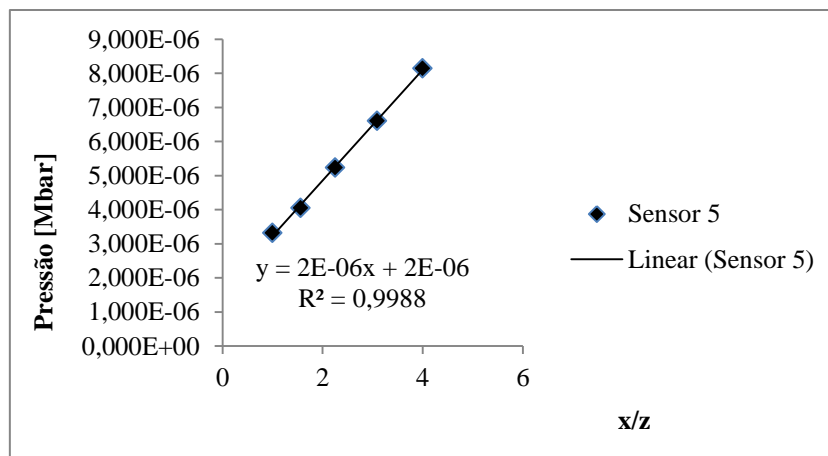
**Tabela 6.10** – Pressões registadas nos sensores 3 e 5 para os cinco compartimentos e os valores da relação x/z dos compartimentos.

Compartimento	x/z	Sensor 3		Sensor 5	
		*d [cm]	Pressão [Mbar]	d [cm]	Pressão [Mbar]
1	1	51,10	5,38E-06	29,5	3,32E-06
2	1,56	52,83	4,76E-06	23,5	4,05E-06
3	2,25	56,84	4,18E-06	19,5	5,24E-06
4	3,09	62,02	4,10E-06	16,5	6,61E-06
5	4	67,98	3,35E-06	14,5	8,14E-06

\*d – Distância do ponto de detonação do explosivo ao sensor

Na Figura 6.7 e na Figura 6.8 ilustram-se os gráficos das análises regressivas lineares da pressão em função da relação x/y dos compartimentos para os sensores 3 e 5, respetivamente.

**Figura 6.7** – Análise regressiva linear da pressão em função da relação x/z dos compartimentos para o sensor 3.



**Figura 6.8** – Análise regressiva linear da pressão em função da relação x/z dos compartimentos para o sensor 5.

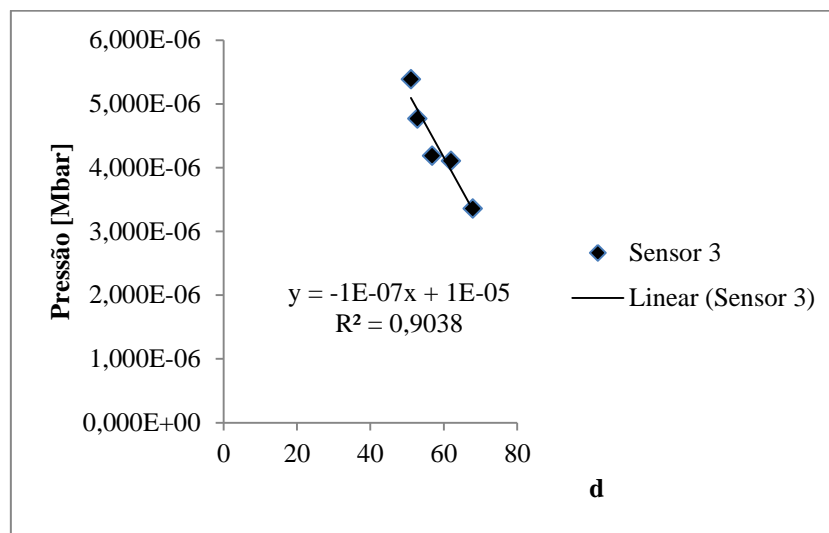
Analisando o gráfico da Figura 6.7, observa-se que o coeficiente de determinação<sup>5</sup> é de  $R^2 = 0.9412$ , indicando que 94.12% das variações da pressão no sensor 3 são explicadas pelas variações da relação x/z dos compartimentos. O coeficiente de correlação<sup>6</sup> é de  $R = -0.97$ , o que demonstra uma “forte” dependência entre a pressão no sensor 3 e a relação x/z dos compartimentos. Também a correlação é negativa, o que indica que à medida que se vai aumentando a relação x/z dos compartimentos, a pressão vai se diminuindo.

Para o gráfico da Figura 6.8 o coeficiente de determinação é de  $R^2 = 0.9988$  indicando que 99.88% das variações da pressão no sensor 5 são explicadas pela variação da relação x/z dos compartimentos. A correlação é de  $R = 0.999$  indicando que a pressão no sensor 5 depende “fortemente” da relação x/z dos compartimentos, por outro lado, ao contrário do sensor 3, a correlação no sensor 5 é positiva, o que demonstra que, aumentar a relação x/z dos compartimentos faz com que a pressão no sensor 5 vá aumentando.

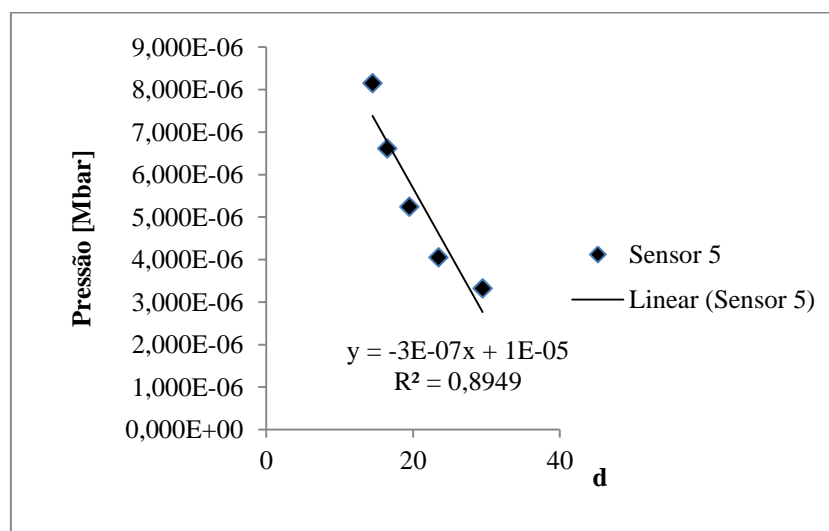
<sup>5</sup> O coeficiente de determinação é utilizado, na estatística, como uma medida da adequação (ou do ajuste) do modelo de regressão obtido. Pode entender-se como a proporção (ou percentagem) da variabilidade da variável dependente que é explicada pela variável independente de acordo com o modelo de regressão obtido ( $0 \leq r^2 \leq 1$ ) [54].

<sup>6</sup> O coeficiente de correlação é uma grandeza que permite aferir a força do relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias. O coeficiente de correlação assume valores entre  $-1$  (associação inversa perfeita) e  $1$  (associação direta perfeita), ou seja,  $-1 \leq r \leq 1$ . Se o coeficiente de correlação assumir o valor 0, implica que as variáveis (dependente e independente) não dependem linearmente uma da outra. Quanto mais próximo de  $|1|$  estiver o coeficiente de correlação, mais “forte” será o grau de associação entre as duas variáveis aleatórias consideradas [54].

Na Figura 6.9 e na Figura 6.10 ilustram-se os gráficos das análises de regressão linear da pressão em função da distância (d) entre o ponto de detonação do explosivo e os sensores 3 e 5, respetivamente. Pode-se observar que o coeficiente de determinação para os dois gráficos é aproximadamente igual a 0.9 demonstrando que para os dois sensores (sensores 3 e 5), 90% das variações da pressão são explicadas pelas variações das distâncias entre o ponto de detonação do explosivo e os respectivos sensores. Também para ambos os sensores, a correlação encontrada foi de  $R \approx -0.95$  demonstrando que a pressão depende “fortemente” da distância entre o ponto de detonação do explosivo e o sensor. Para ambos os casos a correlação é negativa, indicando que à medida que se afasta do ponto de detonação do explosivo a pressão vá diminuindo.



**Figura 6.9** – Análise regressiva linear da pressão em função da distância entre o ponto de detonação do explosivo e o sensor 3 para os cinco compartimentos.



**Figura 6.10** – Análise regressiva linear da pressão em função da distância entre o ponto de detonação do explosivo e o sensor 5 para os cinco compartimentos.

## 6.2 Determinação da relação fenomenológica

Nesta secção, foram considerados os modelos numéricos dos compartimentos 1, 2, 3, 4 e 5 referidas na secção 6.1, em que se simulou a detonação da mesma massa de TNT (40 g) também considerada na secção 6.1 para diferentes posições no interior dos cinco compartimentos. Os resultados das pressões máximas para cada compartimento relativamente ao posicionamento do explosivo foram utilizados para conduzir um estudo estatístico, utilizando os métodos de regressão linear simples e multivariada, com o objetivo de determinar uma relação fenomenológica que permita prever as pressões máximas dentro de um compartimento totalmente confinado, de geometria prismática retangular.

Também neste estudo a técnica do *mapping* foi utilizada e o mesmo ficheiro binário do modelo 2D utilizada na secção 6.1 foi também aqui utilizado e mapeado nas diferentes posições nos modelos numéricos dos cinco compartimentos (ver posicionamentos do alto-explosivo TNT para cada compartimento na Tabela 6.11).

## 6.3 Apresentação e análise dos resultados

Os resultados das pressões máximas registados nos dezanove sensores, obtidas após a simulação da explosão do TNT para diferentes posições dentro dos cinco compartimentos, estão apresentados no ANEXO-I.

Na Tabela 6.11 apresentam-se os resultados das pressões máximas registadas para cada compartimento, relativamente à posição do explosivo dentro dos compartimentos.

Para realizar o estudo estatístico recorrendo aos métodos de regressão simples e multivariada, foi utilizada a função PROJ.LIN do Microsoft Excel. A função PROJ.LIN calcula os parâmetros estatísticos de uma linha (exemplo: os valores dos coeficientes  $m_1, m_2, \dots, m_n$  da equação (6.1) e o coeficiente de determinação) utilizando o método dos mínimo quadrados, de modo a determinar uma linha que se adapte melhor aos dados e, em seguida, devolve uma matriz que descreve a linha. A equação para a linha no caso da regressão multivariada está descrita pela expressão (6.1).

$$y = b + m_1x_1 + m_2x_2 + \dots + m_nx_n \quad (6.1)$$

Onde,  $y$  é a variável dependente e  $x_1, x_2, \dots, x_n$  são as variáveis independentes,  $b$  é um valor constante e os valores de  $m$  são coeficientes que correspondem a cada um dos valores de  $x$ .

As variáveis independentes consideradas neste estudo foram: a distância escalada ( $Z$ ), a relação  $x/z$  dos compartimentos e a posição do explosivo ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). A Tabela 6.11 apresenta os valores das variáveis independentes e da variável dependente (pressão) para esta análise regressiva multivariada.

**Tabela 6.11** – Resultados das pressões máximas registadas para cada compartimento, relativamente ao posicionamento do explosivo.

Caixa	N	Sensor	Distância escalada ( $Z$ ) [ $cm / g^{1/3}$ ]	$x/z$	Posição do explosivo [cm]			P-Max [Mbar]
					x	y	z	
Caixa-1	1	7	16,959	1	15	0	0	8,144E-06
	2	4	23,984	1	15	15	0	1,103E-05
	3	3	29,374	1	15	15	15	1,831E-05
	4	3	59,762	1	0	0	0	5,381E-06
Caixa-2	5	3	49,006	1,56	18,75	0	0	6,908E-06
	6	1	16,959	1,56	0	15	0	7,677E-06
	7	5	13,450	1,56	0	0	12	1,231E-05
	8	3	38,713	1,56	18,75	15	0	1,007E-05
	9	16	13,450	1,56	18,75	0	12	1,233E-05
	10	2	21,646	1,56	0	15	12	1,294E-05
	11	3	30,400	1,56	18,75	15	12	1,436E-05
	12	3	61,796	1,56	0	0	0	4,764E-06
Caixa-3	13	3	48,711	2,25	22,5	0	0	6,499E-06
	14	2	28,422	2,25	0	15	0	8,449E-06
	15	5	11,111	2,25	0	0	10	1,555E-05
	16	3	38,339	2,25	22,5	15	0	9,819E-06
	17	16	11,111	2,25	22,5	0	10	1,555E-05
	18	13	11,111	2,25	0	15	10	1,555E-05
	19	14	11,111	2,25	22,5	15	10	1,555E-05
	20	5	22,807	2,25	0	0	0	5,240E-06
Caixa-4	21	16	19,299	3,09	26,25	0	0	6,662E-06
	22	2	25,691	3,09	0	15	0	9,653E-06
	23	5	9,357	3,09	0	0	8,5	1,624E-05
	24	3	39,587	3,09	26,25	15	0	9,972E-06
	25	16	9,357	3,09	26,25	0	8,5	1,746E-05
	26	13	9,357	3,09	0	15	8,5	1,624E-05
	27	14	9,357	3,09	26,25	15	8,5	1,746E-05
	28	5	19,299	3,09	0	0	0	6,610E-06
Caixa-5	29	16	16,959	4	30	0	0	8,144E-06
	30	2	23,984	4	0	15	0	1,056E-05
	31	5	8,187	4	0	0	7,5	9,108E-06
	32	11	23,984	4	30	15	0	1,056E-05
	33	16	8,187	4	30	0	7,5	9,107E-06
	34	2	18,832	4	0	15	7,5	1,226E-05
	35	11	18,832	4	30	15	7,5	1,226E-05
	36	5	16,959	4	0	0	0	8,144E-06

N – Número de casos estudados.

Foram realizadas sete análises de regressão e os resultados dos coeficientes de determinação estão apresentadas na Tabela 6.12.

**Tabela 6.12 – Análises de regressão**

Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) [%]	Variáveis independentes		
	Distância escalada (Z)	Posição do explosivo (x, y, z)	Relação x/z
30.47	*		
0.03			*
75.27		*	
35.71	*		*
75.86		*	*
78.50	*	*	
78.56	*	*	*

Analisando os coeficientes de determinação para as variáveis independentes consideradas, pode-se observar que a relação x/z apresenta um coeficiente de determinação de 0.03 % o que indica que as variações das pressões no interior dos compartimentos fechados considerados praticamente não são explicadas pelas variações da relação x/z, ao contrário da distância escalada (Z) e da posição do explosivo (x, y, z) que apresentam valores de coeficiente de determinação iguais a 30.47 % e 75.27 %, respetivamente.

A relação fenomenológica foi então determinada considerando a análise de regressão multivariada das variáveis independentes da distância escalada (Z) e da posição do explosivo (x, y, z). A equação da relação fenomenológica é dada pela expressão (6.2) .

$$P = (8,402E-06) - (-5,6506E-08) \cdot Z + (3,59288E-08) \cdot x + (1,50319E-07) \cdot y + (5,11195E-07) \cdot z \quad (6.2)$$

O coeficiente de determinação encontrada na análise regressiva multivariada foi de 0.785, o que indica que 78.5 % das variações das pressões no interior dos compartimentos fechados considerados são explicados pelas variações da distância escalada (Z) e da posição do explosivo (x, y, z). Tendo em conta o coeficiente de determinação, pressupõe-se que o modelo de regressão determinado (expressão (6.2)) seja adequado para prever as pressões máximas dentro de um compartimento fechado, de geometria prismática retangular. Nota-se que, o modelo de regressão (expressão (6.2)) é válido apenas para os dados amostrais no âmbito desta tese e que uma extrapolação do mesmo para valores fora do âmbito dos dados amostrais pode produzir resultados errados.

A fim de verificar a efetividade da relação fenomenológica (expressão (6.2)) realizou-se uma estimativa dos valores das pressões máximas registadas nos compartimentos 1, 2, 3, 4 e 5. Na Tabela 6.13 estão apresentados os resultados das estimativas e os erros relativos entre os valores de pressões estimados com equação (6.2) e os valores de pressões máximas registadas nos compartimentos. A média dos erros relativos entre as pressões nos compartimentos e as estimativas das pressões foi de 12,694 % e a dispersão de 9,914 %. O erro mínimo e o erro máximo encontrados foram de 0,624 % e de 41,114 %, respetivamente.

Analisando os resultados das estimativas das pressões na Tabela 6.13 pode-se observar que a maioria dos casos considerados neste trabalho, isto é 25 em 36 casos, apresentam um erro inferior à média dos erros. No entanto 11 dos 36 casos considerados apresentam um erro superior à média e 2 deles superiores à 30 %. Esses casos podem ser justificados pelo limitado número de parâmetros considerados para estimar a pressão neste trabalho (a posição do explosivo e a distância escalada).

Outros parâmetros que podem influenciar a onda de pressão dentro de compartimento fechado são o ângulo de incidência (ângulo formado entre o ponto de detonação do explosivo e um ponto de interesse) e as reflexões das mesmas. O manual da UFC considera que o ângulo de incidência é um fator que influencia a pressão para os casos de *free air burst*, *air burst* e *surface burst*. No entanto, o manual não considera este parâmetro para efeitos de previsão da pressão em explosões confinadas. Quanto às reflexões das ondas de pressão, sabe-se que estas podem ser amplificadas nas paredes de um compartimento fechado, contudo está fora do âmbito do trabalho a determinação das proporções em que podem ser amplificadas pois estes podem reforçar-se ou anular-se consoante a sua direção e sentido, pelo que a influência desses parâmetros na onda de pressão devem ser investigados.

O erro médio determinado para o presente estudo é suscetível de melhoramento. O número de casos pode ser aumentado de maneira que se faça dispersar o erro ou ainda pode ser considerado outros modelos estatísticos de regressão que se adaptem melhor aos dados. O estudo necessita de mais aprofundamento.

**Tabela 6.13** – Estimativas das pressões.

Comp.	N	Sensor	Estimativa da Pressão [Mbar]	Erro Relativo [%]
1	1	7	7,98E-06	1,985
	2	4	9,84E-06	10,768
	3	3	1,72E-05	6,052
	4	3	5,03E-06	6,608
2	5	3	6,31E-06	8,704
	6	1	9,7E-06	26,332
	7	5	1,38E-05	11,930
	8	3	9,14E-06	9,179
	9	16	1,44E-05	17,203
	10	2	1,56E-05	20,347
	11	3	1,57E-05	9,636
	12	3	4,91E-06	3,060
3	13	3	6,46E-06	0,624
	14	2	9,05E-06	7,118
	15	5	1,29E-05	17,110
	16	3	9,3E-06	5,301
	17	16	1,37E-05	11,910
	18	13	1,51E-05	2,606
	19	14	1,59E-05	2,594
	20	5	7,11E-06	35,747
4	21	16	8,25E-06	23,907
	22	2	9,21E-06	4,640
	23	5	1,22E-05	24,768
	24	3	9,36E-06	6,104
	25	16	1,32E-05	24,614
	26	13	1,45E-05	10,885
	27	14	1,54E-05	11,700
	28	5	7,31E-06	10,620
5	29	16	8,52E-06	4,638
	30	2	9,3E-06	11,892
	31	5	1,18E-05	29,269
	32	14	1,04E-05	1,682
	33	16	1,29E-05	41,114
	34	2	1,34E-05	9,480
	35	11	1,45E-05	18,269
	36	5	7,44E-06	8,598
Média				12,694 %
Dispersão				9,914 %
Erro mínimo				0,624 %
Erro máximo				41,114 %

\*Comp. - Compartimento





## Capítulo 7 Conclusões

### 7.1 Conclusões

Neste trabalho, foi utilizado o hidrocódigo LS-DYNA para gerar um modelo numérico para realizar um estudo paramétrico sobre explosões confinadas e posteriormente desenvolver uma relação fenomenológica para prever as pressões máximas dentro de um compartimento fechado de geometria prismática retangular.

Utilizando o LS-DYNA, a metodologia ALE foi calibrada e verificou-se que a mesma pode ser utilizada com sucesso para simular o fenómeno da detonação de um alto-explosivo quer em espaço aberto quer em espaço confinado.

A calibração da metodologia ALE é um processo complexo, pois vários fatores podem influenciar os resultados da simulação da detonação de um alto-explosivo, nomeadamente, a densidade da malha de elementos finitos, o método de advecção, as condições de fronteiras ou mesmo o computador utilizado para realizar os cálculos.

As características de uma explosão confinada foram investigadas.

- ✓ Verificou-se que numa explosão confinada a intensidade do pico de pressão é amplificada pelo confinamento da estrutura. Verificou-se também que múltiplos picos de pressão ocorrem devido às reflexões das ondas de pressão nas paredes da estrutura, enquanto o manual da UFC assume um único pico de pressão;
- ✓ Vários fatores influenciam a onda de pressão no interior de um espaço confinado, nomeadamente a geometria, o confinamento do espaço e a posição do explosivo no interior do espaço confinado;
- ✓ A pressão no interior de um espaço totalmente confinado tende para um valor estático superior a pressão atmosférica devido a contenção total dos gases gerados na detonação do alto explosivo, uma vez que não existem aberturas que os possam libertar;
- ✓ A utilização do manual da UFC para prever as pressões dentro de um espaço confinado pode produzir resultados errados, pois assume que a pressão é uniforme dentro de um espaço confinado o que não se verifica na realidade. A distribuição de pressão nas paredes da estrutura de uma câmara fechada é não uniforme.

## **7.2 Trabalho futuro**

É de interesse realizar um estudo experimental por forma a estudar a resposta de uma estrutura sujeito a um carregamento confinado. Também é de interesse possuir dados que possam servir para validações numéricas.

Neste trabalho foi proposto uma relação fenomenológica para prever as pressões máximas geradas dentro de um compartimento de geometria prismática retangular, no entanto o estudo necessita de aprofundamento. É necessário investigar mais os parâmetros que afetam a pressão no interior de um espaço confinado. Uma outra possibilidade seria considerar outros modelos estatísticos para o tratamento dos dados por forma a se poderem desenvolver metodologias mais precisas para estimar a pressão devido a um carregamento confinado.

## Referências

- [1] M. S. Chafi, G. Karami, and M. Ziejewski, “Numerical analysis of blast-induced wave propagation using FSI and ALE multi-material formulations,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 36, no. 10–11, pp. 1269–1275, Oct. 2009.
- [2] X. Q. Zhou and H. Hao, “Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 35, no. 5, pp. 363–375, May 2008.
- [3] A. Remennikov, “The state of the art of explosive loads characterisation,” pp. 1–25, 2007.
- [4] C. Wu, M. Lukaszewicz, K. Schebella, and L. Antanovskii, “Experimental and numerical investigation of confined explosion in a blast chamber,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 26, no. 4, pp. 737–750, Jul. 2013.
- [5] Y. Hu, C. Wu, M. Lukaszewicz, J. Dragos, J. Ren, and M. Haskett, “Characteristics of Confined Blast Loading in Unvented Structures,” *Int. J. Prot. Struct.*, vol. 2, no. 1, pp. 21–44, Mar. 2011.
- [6] U. S. A. C. of Engineers, N. F. E. Command, and A. F. C. E. S. Agency, “UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions,” 2008.
- [7] A. Zyskowski, I. Sochet, G. Mavrot, P. Bailly, and J. Renard, “Study of the explosion process in a small scale experiment—structural loading,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 17, no. 4, pp. 291–299, Jul. 2004.
- [8] J. O. Keller, M. Gresho, a. Harris, and a. V. Tchouvelev, “What is an explosion?,” *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–8, Jun. 2014.
- [9] R. J. Martin, A. Reza, and L. W. Anderson, “What is an explosion? A case history of an investigation for the insurance industry,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 13, no. 6, pp. 491–497, Nov. 2000.
- [10] T. Urbanski and S. Vasudeva, “EXPLOSIONS AND EXPLOSIVES-FUNDAMENTAL-ASPECTS,” *J. Sci. Ind. ...*, vol. 40, pp. 512–519, 1981.
- [11] J. P. Agrawal and R. D. Hodgson, *Organic Chemistry of Explosives*. 2007.
- [12] P. Sherkar, A. S. Whittaker, and A. J. Aref, “Modeling the Effects of Detonations of High Explosives to Inform Blast-Resistant Design,” 2010.
- [13] F. Dolce, “Blast impact simulation on composite military armours,” UNIVERSITY OF BATH, 2009.
- [14] T. Davis, “The chemistry of powder and explosives,” 1943.

- [15] E. Scarin, “Fem Analysis of the Fluid Structure Interaction between shock-waves and deformable structures,” UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA.
- [16] P. Cooper, *Explosives Engineering*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996, p. 460.
- [17] S. Eveillard, “Propagation d ’ une onde de choc en présence d ’ une barrière de protection,” Université d’Orléans, 2013.
- [18] J. Zukas and W. Walters, *Explosive effects and applications*, 2nd Editio. Springer, 2002, p. 433.
- [19] B. Zakrisson, “Numerical simulations of blast loaded steel plates for improved vehicle protection,” Luleå University of Technology, 2013.
- [20] J. Martins, “Blast-wave absorption capacity of sandwich structures incorporating cellular materials,” Univercidade de Aveiro, 2012.
- [21] K. Alhussan, K. L. Stepanov, Y. a. Stankevich, a. S. Smetannikov, and S. a. Zhdanok, “Hydrodynamics of the initial phase of explosion,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 7–8, pp. 1627–1640, Mar. 2011.
- [22] C. R. Wilkinson and J. G. Anderson, “An Introduction to Detonation and Blast for the Non-Specialist.”
- [23] I. Sochet, “Blast effects of external explosions,” 2011.
- [24] C. Geretto, S. Chung Kim Yuen, and G. N. Nurick, “An experimental study of the effects of degrees of confinement on the response of square mild steel plates subjected to blast loading,” *Int. J. Impact Eng.*, Aug. 2014.
- [25] J. A. Zukas, *Introduction to Hydrocodes*. Elsevier Ltd, 2004.
- [26] K. G. Webster, “Investigation of Close Proximity Underwater Explosion Effects on a Ship-Like Structure Using the Multi-Material Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Method,” Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- [27] J. O. Hallquist, *Theory manual*, no. March. LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, 2006.
- [28] Y. Liu, “ANSYS and LS-DYNA used for structural analysis Yucheng Liu,” *Int. J. Comput. Aided Eng. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 31–44, 2008.
- [29] T. Belytschko, W. K. Liu, and B. Moran, *Nonlinear Finite Elements For Continua And Structures*. John Wiley & Sons Ltd, 2000.
- [30] S. J. Hiermaier, *Structures Under Crash and Impact Continuum Mechanics, Discretization and Experimental Characterization*. Springer, 2008.

- [31] D. J. Benson and C. D. J. Benson, "COMPUTATIONAL METHODS IN LAGRANGIAN AND EULERIAN HYDROCODES," 1990.
- [32] C. Linder, "An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Formulation for Dynamics and Finite Strain Plasticity Models," UNIVERSITY STUTTGART, 2003.
- [33] E. Vitali, "An extended finite element formulation for contact in multi-material arbitrary Lagrangian-Eulerian Calculations," UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO, 2007.
- [34] K. Mahmadi and N. Aquelet, "Delayed mesh relaxation for multi-material ALE formulation," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 46, pp. 102–111, Apr. 2014.
- [35] I. Do and J. Day, "OVERVIEW OF ALE METHOD IN LS - DYNA," 2005, pp. 1–48.
- [36] D. J. Benson, "A multi-material Eulerian formulation for the efficient solution of impact and penetration problems," vol. 15, no. April 1994, 1995.
- [37] A. Alia and M. Souli, "High explosive simulation using multi-material formulations," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 10, pp. 1032–1042, Jul. 2006.
- [38] J. Hallquist, *LS-DYNA3D theoretical manual*. LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION, 1993.
- [39] D. Carlsson, "Arbitrary Lagrangian-Eulerian Simulations of a Pressure Pulse inside a Flexible Porous Fabric Bag," CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2014.
- [40] M. Forsblom, "Supersonic Artillery Projectile Fin Deployment Simulation Methodology," Luleå University of Technology, 2013.
- [41] V. Lapoujade, N. V. A. N. Dorsselaer, S. Kevorkian, and K. Cheval, "A Study of Mapping Technique for Air Blast Modeling," in *11th International LS-DYNA Users Conference*, 2010, no. 1, pp. 23–32.
- [42] K. U. S. Manual, *KEYWORD USER 'S MANUAL*, vol. I, no. February. 2013.
- [43] B. Zakrisson, B. Wikman, and H.-Å. Häggblad, "Numerical simulations of blast loads and structural deformation from near-field explosions in air," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 38, no. 7, pp. 597–612, Jul. 2011.
- [44] K. U. S. Manual and V. Ii, *KEYWORD USER 'S MANUAL VOLUME II*, vol. II, no. February. 2013.
- [45] M. Larcher, "Simulation of the Effects of an Air Blast Wave," 2007.

- [46] N. Aquelet, “2D to 3D ALE Mapping,” in *10th International LS-DYNA Users Conference*, 2008, pp. 23–34.
- [47] M. Souli, “LS-DYNA Advanced Course in ALE and Fluid/Structure Coupling Notes.” Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2003.
- [48] N. Aquelet, M. Souli, and L. Olovsson, “Euler–Lagrange coupling with damping effects: Application to slamming problems,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 195, no. 1–3, pp. 110–132, Jan. 2006.
- [49] N. Aquelet, C. Seddon, M. Souli, and M. Moatamedi, “Initialisation of volume fraction in fluid/structure interaction problem,” *Int. J. Crashworthiness*, vol. 10, no. 3, pp. 237–247, Mar. 2005.
- [50] J. Day, “Guidelines for ALE Modeling in LS-DYNA,” 2009.
- [51] L. E. Schwer, “IS YOUR MESH REFINED ENOUGH? Estimating Discretization Error using GCI,” pp. 45–54, 2008.
- [52] J. Dragos, C. Wu, and D. J. Oehlers, “Simplification of fully confined blasts for structural response analysis,” *Eng. Struct.*, vol. 56, pp. 312–326, Nov. 2013.
- [53] H. Department Of The Army, *US Army Explosives and Demolitions Handbook*, vol. 214, no. July. 2010.
- [54] E. Esteves, “Apontamentos de Estatística,” 2007.





# ANEXOS

## ANEXO-A

Programa do MATLAB para converter os ficheiro .txt das malhas geradas no ANSYS para os ficheiro .k das malhas do LS-PrePost.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Este programa lê o ficheiro 'malha.txt' produzido pelo ANSYS
% e escreve o ficheiro 'malha.k' para ser lido pelo LS-DYNA
%
% Tese de doutoramento de Francisco Salvado, 2013
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
fin= fopen('malha.txt','r');
fout= fopen('malha.k','w');
%
% Escreve o cabeçalho de 'malha.k'
fprintf(fout,'$# LS-DYNA Keyword File created by ANSYS\r\n');
fprintf(fout,'*KEYWORD\r\n');
fprintf(fout,'*PART\r\n');
fprintf(fout,'$# title\r\n');
fprintf(fout,'Box\r\n');
fprintf(fout,'$# pid secid mid eosid hgid grav adpopt tmid\r\n');
fprintf(fout,'      1      0      0      0      0      0      0\r\n');
fprintf(fout,'*ELEMENT SOLID\r\n');
fprintf(fout,'$# eid pid n1 n2 n3 n4 n5 n6 n7 n8\r\n');
%
% Lê e escreve a topologia dos elementos
nelementos= fscanf(fin,'%d',1);
fprintf('numero de elementos= %7d\n',nelementos);
for i=1:nelementos
    id= fscanf(fin,'%d',1);
    no= fscanf(fin,'%f',[8 1]);
    fprintf(fout,' %7d      1 %7d %7d %7d %7d %7d %7d %7d %7d\r\n',...
        id,no(1),no(2),no(3),no(4),no(5),no(6),no(7),no(8));
end
%
fprintf(fout,'*NODE\r\n');
fprintf(fout,'$#   nid      x      y      z      tc      rc\r\n');
%
nnos= fscanf(fin,'%d',1);
fprintf('numero de nos= %7d\n',nnos);
for i=1:nnos
    nos= fscanf(fin,'%f',[4 1]);
    fprintf(fout,' %7d %15.7f %15.7f %15.7f  0  0\r\n',...
        nos(1),nos(2),nos(3),nos(4));
end
%
fprintf(fout,'*END\r\n');
%
% fim
```

## ANEXO-B

Ficheiro APDL utilizado para gerar os ficheiros .txt das malhas do exemplo da explosão do alto-explosivo C-4 ao ar livre no ANSYS.

```
!-----
! Este programa APDL gera o ficheiro 'malha.txt' com a definição
! da malha para o LS-Dyna, na diretoria de trabalho do ANSYS
!-----
-

/PREP7

!*

ET,1,SOLID45

!*

!*

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,1,,210e9
MPDATA,PRXY,1,,0.3

!

! Parâmetros geométricos do modelo
! =====
!

! Nota: Estes parâmetros podem ser alterados, mas deve sempre
verificar-se

!      a qualidade da malha final gerada
!

L= 10                ! Lado do cubo no interior da esfera
L1=0.8*L            ! Comprimento do vértice mais pequeno do cubo
R1= 80               ! Raio da esfera 1
R2= 300              ! Raio da esfera 2

!

NEc= 20              ! Numero de elementos ao longo de cada aresta do
cubo

NE= 40               ! Numero de elementos ao longo de cada aresta dos
volumes menores
```

```

NELM= 2*R2/L      ! Define o numero de elementos ao longo das arestas
dos volumes maiores

!

IELM1= 7          ! Incremento no lado de cada elemento ao longo da
aresta da esfera de Raio R1

IELM3= 4          ! Incremento nas diagonais dos volumes menores

!

! Definição dos Keypoints
! =====
!
! Nos vértices do cubo de lado L
!
K,1,0,0,0
K,2,L,0,0
K,3,L1,L1,0
K,4,0,L,0
K,5,0,0,L
K,6,L1,0,L1
K,7,L1,L1,L1
K,8,0,L1,L1
!
! Sobre a superfície da esfera de raio R1
!
K,9,R1,0,0
K,10,R1*SQRT(2)/2,R1*SQRT(2)/2,0
K,11,0,R1,0
K,12,0,R1*SQRT(2)/2,R1*SQRT(2)/2
K,13,0,0,R1
K,14,R1*SQRT(2)/2,0,R1*SQRT(2)/2
K,15,R1/SQRT(3),R1/SQRT(3),R1/SQRT(3)
!
! Sobre a superfície da esfera de raio R2
!

```

```

K,16,R2,0,0
K,17,R2*SQRT(2)/2,R2*SQRT(2)/2,0
K,18,0,R2,0
K,19,0,R2*SQRT(2)/2,R2*SQRT(2)/2
K,20,0,0,R2
K,21,R2*SQRT(2)/2,0,R2*SQRT(2)/2
K,22,R2/SQRT(3),R2/SQRT(3),R2/SQRT(3)
!
! Definição das linhas
! =====
!
! Segmentos rectos nas arestas do cubo de lado L
!
LSTR,1,2          ! 1
LSTR,2,3          ! 2
LSTR,3,4          ! 3
LSTR,1,4          ! .
LSTR,1,5
LSTR,5,8
LSTR,4,8
LSTR,5,6
LSTR,6,7
LSTR,7,8
LSTR,2,6
LSTR,3,7          ! 12
!
! Segmentos rectos que ligam o cubo à esfera de raio R1
!
LSTR,2,9          ! 13
LSTR,3,10         ! 14
LSTR,4,11         ! .
LSTR,8,12

```

```

LSTR,5,13

LSTR,6,14          ! 18

LSTR,7,15          ! 19

!

! Arcos sobre a superfície da esfera de raio R1

LARC,9,10,1,R1     ! 20

LARC,10,11,1,R1    ! 21

LARC,11,12,1,R1    ! .

LARC,12,13,1,R1

LARC,13,14,1,R1

LARC,9,14,1,R1

LARC,10,15,1,R1

LARC,12,15,1,R1

LARC,14,15,1,R1    ! 28

!

! Segmentos rectos que ligam a esfera de raio R1 à esfera de raio R2

!

LSTR,9,16          ! 29

LSTR,10,17         ! 30

LSTR,11,18         ! .

LSTR,12,19

LSTR,13,20

LSTR,14,21         ! 34

LSTR,15,22         ! 35

!

! Arcos sobre a superfície da esfera de raio R2

LARC,16,17,1,R2    ! 36

LARC,17,18,1,R2    ! 37

LARC,18,19,1,R2    ! .

LARC,19,20,1,R2

LARC,20,21,1,R2

LARC,16,21,1,R2

```

```

LARC,17,22,1,R2
LARC,19,22,1,R2
LARC,21,22,1,R2      ! 44
!
! Definição das superfícies
! =====
!
! Faces do cubo de lado L
AL,1,2,3,4           ! 1
AL,4,5,6,7           ! 2
AL,6,8,9,10          ! 3
AL,2,9,11,12         ! 4
AL,3,7,10,12         ! 5
AL,1,5,8,11          ! 6
!
! Faces dos 3 volumes menores
!
AL,3,14,15,21        ! 7
AL,7,15,16,22        ! 8
AL,10,16,19,27       ! 9
AL,12,14,19,26       ! 10
AL,21,22,26,27       ! 11
!
AL,6,16,17,23        ! 12
AL,8,17,18,24        ! 13
AL,9,18,19,28        ! 14
AL,23,24,27,28       ! 15
!
AL,11,13,18,25       ! 16
AL,2,13,14,20        ! 17
AL,20,25,26,28       ! 18
!

```

```

! Faces dos 3 volumes maiores
!
AL,21,30,31,37      ! 19
AL,22,31,32,38      ! 20
AL,27,32,35,43      ! 21
AL,26,30,35,42      ! 22
AL,37,38,42,43      ! 23
!
AL,23,32,33,39      ! 24
AL,24,33,34,40      ! 25
AL,28,34,35,44      ! 26
AL,39,40,43,44      ! 27
!
AL,25,29,34,41      ! 28
AL,20,29,30,36      ! 29
AL,36,41,42,44      ! 30
!
! Definição dos volumes
! =====
!
! Cubo de lado L
VA,1,2,3,4,5,6
!
! Definição dos 3 volumes menores
!
VA,5,7,8,9,10,11
VA,3,9,12,13,14,15
VA,4,10,14,16,17,18
!
! Definição dos 3 volumes maiores
!
VA,11,19,20,21,22,23

```

```

VA,15,21,24,25,26,27
VA,18,22,26,28,29,30
!
! Geração da malha
! =====
!
/AUTO,1
/REP,FAST
!ESIZE,0,NE,
!
! Controlo da malha através da definição
! do numero de elementos ao longa das arestas
!
! Cubo de lado L1
!
LESIZE,1,,,NEC,1,,,,1
LESIZE,2,,,NEC,1,,,,1
LESIZE,3,,,NEC,1,,,,1
LESIZE,4,,,NEC,1,,,,1
LESIZE,5,,,NEC,1,,,,1
LESIZE,6,,,NEC,1,,,,1
LESIZE,7,,,NEC,1,,,,1
LESIZE,8,,,NEC,1,,,,1
LESIZE,9,,,NEC,1,,,,1
LESIZE,10,,,NEC,1,,,,1
LESIZE,11,,,NEC,1,,,,1
LESIZE,12,,,NEC,1,,,,1
!
! 3 volumes menores
!
LESIZE,13,,,NE,IELM3,,,,1
LESIZE,15,,,NE,IELM3,,,,1

```



```

LESIZE,17,,,NE,IELM3,,,,1
!
LESIZE,14,,,NE,IELM1,,,,1
LESIZE,16,,,NE,IELM1,,,,1
LESIZE,18,,,NE,IELM1,,,,1
LESIZE,19,,,NE,IELM1,,,,1
!
! 3 volumes maiores
!
LESIZE,29,,1,NELM,,,,,1
LESIZE,31,,1,NELM,,,,,1
LESIZE,33,,1,NELM,,,,,1
!
LESIZE,30,,,NELM,,,,,1
LESIZE,32,,,NELM,,,,,1
LESIZE,34,,,NELM,,,,,1
LESIZE,35,,,NELM,,,,,1
!
! Criação da malha
!
MSHAPE,0,3D
MSHKEY,1
!*
FLST,5,7,6,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-7
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*

```

```

VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!
/VIEW, 1, -0.892006933058, -0.321850516084, -0.317389156515
/ANG, 1, 108.317538895
EPLOT
FINISH
!
! Escreve os elementos e os nos no ficheiro 'malha.txt'
! =====
!
!
/POST1
*CFOPEN,malha,txt,,
*GET,NUMNODE,NODE,0,COUNT
*GET,NUMEL,ELEM,0,COUNT
!
! Escreve a topologia dos elementos
!
*VWRITE,NUMEL

%8I

!(F10.0)
!
*DO,I,1,NUMEL
*GET,NO1,ELEM,I,NODE,1
*GET,NO2,ELEM,I,NODE,2
*GET,NO3,ELEM,I,NODE,3
*GET,NO4,ELEM,I,NODE,4
*GET,NO5,ELEM,I,NODE,5
*GET,NO6,ELEM,I,NODE,6

```

```

*GET,NO7,ELEM,I,NODE,7

*GET,NO8,ELEM,I,NODE,8

*VWRITE,I

%8I

*VWRITE,NO1,NO2,NO3,NO4,NO5,NO6,NO7,NO8

%8I %8I %8I %8I %8I %8I %8I %8I

! (F10.0,F8.0,F8.0,F8.0,F8.0,F8.0,F8.0,F8.0,F8.0)

*ENDDO

!

! Escreve as coordenadas dos nós

!

*VWRITE,NUMNODE

%8I

! (F10.0)

!

*DO,I,1,NUMNODE

*GET,CX,NODE,I,LOC,X

*GET,CY,NODE,I,LOC,Y

*GET,CZ,NODE,I,LOC,Z

*VWRITE,I,CX,CY,CZ

%8I %15.6G %15.6G %15.6G

! (F10.0,E30.12,E30.12,E30.12)

*ENDDO

!

*CFCLOS

FINISH

!

! fim

! ===

```

## ANEXO-C

Comandos utilizados para modelar a explosão do alto-explosivo C-4 ao ar livre no LS-PrePost, utilizando o método de advecção de Donor Cell (Para o método de advecção de Van Leer, METH = 2 em \*CONTROL-ALE).

```
$# LS-DYNA Keyword file created nby LS-PrePost 4.1 (Beta) -
*KEYWORD MEMORY=3000000000
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*PART
$# title
Part-Ar
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt
tmid
          1          1          1          1          1          0          0
0
*SECTION_SOLID
$#      secid      elform      aet
          1          11          0
*MAT_NULL_TITLE
Mat.Ar
$#      mid      ro      pc      mu      terod      cerod      ym
pr
          1 1.2930E-3      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
0.000
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_TITLE
EOS.Ar
$#      eosid      c0      c1      c2      c3      c4      c5
c6
          1      0.000      0.000      0.000      0.000      0.400000      0.400000
0.000
$#      e0      v0
      2.5000E-6      1.000000
*HOURLGLASS
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2      qb/vdc
qw
          1          1 1.0000E-6          1 1.5000E-2 6.0000E-2      0.100000
0.100000
*PART
$# title
Part-Explosivo
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt
tmid
          2          1          2          2          1          0          0
0
*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN_TITLE
Mat.Explosivo
$#      mid      ro      d      pcj      beta      k      g
sigy
          2 1.601000 0.804000 0.281000      0.000      0.000      0.000
0.000
*EOS_JWL_TITLE
EOS.Explosivo
$#      eosid      a      b      r1      r2      omeg      e0
vo
          2 5.981550 0.137500 4.500000 1.500000 0.320000 8.7000E-2
1.000000
```

```

*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP
$#      sid      idtype      gpname
      1          1
      2          1
*CONTROL_ALE
$#      dct      nadv      meth      afac      bfac      cfac      dfac
efac      -1          1          3 -1.000000      0.000      0.000      0.000
0.000
$#      start      end      aafac      vfact      prit      ebc      pref
nsidebc      0.0001.0000E+20      1.000000      1.0000E-6          0          2      1.0000E-6
0
$#      ncpl      nbkt      imascl      checkr
      1          50          0      0.000
*CONTROL_ENERGY
$#      hgen      rwen      slnten      rylene
      2          2          2          1
*CONTROL_TERMINATION
$#      endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
      2000.0000          0      0.000      0.000      0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$#      dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm      erode
msl1st      0.000      0.600000          0      0.000      0.000          0          0
0
$#      dt2msf      dt2mslc      imsc1      unused      unused      rmscl
      0.000          0          0          0          0          0.000
*DATABASE_GLSTAT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
      10.000000          0          0          1
*DATABASE_MATSUM
$#      dt      binary      lcur      ioopt
      10.000000          0          0          1
*DATABASE_TRHIST
$#      dt      binary      lcur      ioopt
      10.000000          0          0          1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid
      10.000000          0          0          0          0
$#      ioopt
      0
*DATABASE_TRACER
$#      time      track      x      y      z      ammg      nid
      0.000          1      88.000000      88.000000      88.000000          0          0
*INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY
$#      fmsid      fmidtyp      bammg      ntrace
      1          1          1          5
$#      conttyp      fillopt      fammg      vx      xy      xz      radvel
unused          6          0          2      0.000      0.000      0.000          0
$#      xc      yc      zc      radius      unused      unused      unused
unused          0.000          0.000          0.000      4.070000
*INITIAL_DETONATION
$#      pid      x      y      z      lt
      2          0.000          0.000          0.000          0.000
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id
heading

```

```

      1x-0
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry
dofrz      1      0      0      1      0      1      0
1
$#      id
heading
      2y-0
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry
dofrz      2      0      1      0      0      0      1
1
$#      id
heading
      3z-0
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry
dofrz      3      0      0      0      1      1      1
0
*INCLUDE
D:\Utilizadores\Arikson\Os Meus Documentos\malha-grande.k
*END

```

## ANEXO-D

Comandos utilizados para modelar a explosão do alto-explosivo TNT dentro da caixa fechada, utilizando o método de advecção de Donor Cell (Para o método de advecção de Van Leer, METH = 2 em \*CONTROL-ALE), no modelo 2D.

```
$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 4.1 (Beta) -
*KEYWORD MEMORY=5000000000
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*PART
$# title
Part-TNT
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt
tmid
          1          1          1          1          1          0          0
0
*SECTION_ALE2D_TITLE
ALE2D
$#      secid      aleform      aet      elform
          1          11          0          14
*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN_TITLE
Mat-TNT
$#      mid      ro      d      pcj      beta      k      g
sigy
          1  1.590000  0.693000  0.210000  0.000  0.000  0.000
0.000
*EOS_JWL_TITLE
EOS-TNT
$#      eosid      a      b      r1      r2      omeg      e0
vo
          1  3.712000  3.2310E-2  4.150000  0.950000  0.300000  7.0000E-2
1.000000
*HOURLGLASS
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2      qb/vdc
qw
          1          1  1.0000E-6          0  1.500000  6.0000E-2  0.100000
0.100000
*PART
$# title
Part-Ar
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt
tmid
          2          1          2          2          1          0          0
0
*MAT_NULL_TITLE
Mat-Ar
$#      mid      ro      pc      mu      terod      cerod      ym
pr
          2  1.2930E-3      0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
0.000
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_TITLE
EOS-Ar
$#      eosid      c0      c1      c2      c3      c4      c5
c6
          2      0.000  0.000  0.000  0.000  0.400000  0.400000
0.000
$#      e0      v0
```

```

2.5600E-6 1.000000
*ALE_REFERENCE_SYSTEM_GROUP
$#      sid      stype      prtype      prid      bctran      bcexp      bcrot
icoord      1      0      8      0      0      0      0
0
$#      xc      yc      zc      explim      efac      unused      frcpad
iexpnd      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
0
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP
$#      sid      idtype      gpname
      1      1
      2      1
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id
heading
      1Constrain-y1
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry
dofrz      1      0      0      1      0      0      0
0
*CONTROL_ALE
$#      dct      nadv      meth      afac      bfac      cfac      dfac
efac      -1      1      3 -1.000000      0.000      0.000      0.000
0.000
$#      start      end      aafac      vfact      prit      ebc      pref
nsidebc      0.0001.0000E+20      1.000000      1.0000E-6      0      2 1.0000E-6
0
$#      ncpl      nbkt      imascl      checkr
      1      50      0      0.000
*CONTROL_ENERGY
$#      hgen      rwen      slnten      rylene
      2      2      2      1
*CONTROL_TERMINATION
$#      endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
30.000000      0      0.000      0.000      0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$#      dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm      erode
msl1st      0.000      0.600000      0      0.000      0.000      0      0
0
$#      dt2msf      dt2mslc      imsc1      unused      unused      rmscl
0.000      0      0      0.000
*DATABASE_GLSTAT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
10.000000      0      0      1
*DATABASE_MATSUM
$#      dt      binary      lcur      ioopt
10.000000      0      0      1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid
10.000000      0      0      0      0
$#      ioopt
0
*INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY
$#      fmsid      fmidtyp      bammg      ntrace
      2      1      2      5

```



```

$# conttyp    fillopt    fammg        vx        xy        xz    radvel
unused
        6          0          1      0.000      0.000      0.000          0
$#      xc      yc      zc      radius    unused    unused    unused
unused
      0.000      0.000      0.000  0.455600
*INCLUDE
$# filename
D:\Utilizadores\Arikson\Os Meus Documentos\Map-2D\Malha-2D.k
*END

```

## ANEXO-E

Comandos utilizados para modelar a explosão do alto-explosivo TNT dentro da caixa fechada, utilizando o método de advecção de Donor Cell (Para o método de advecção de Van Leer, METH = 2 em \*CONTROL-ALE), no modelo 3D.

```
$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 4.1 (Beta) -
*KEYWORD MEMORY=8000000000
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*PART
$# title
Part-TNT
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt
tmid
          1          1          1          1          1          0          0
0
*SECTION_SOLID_TITLE
SOLID
$#      secid      elform      aet
          1          11          0
*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN_TITLE
Mat-TNT
$#      mid      ro      d      pcj      beta      k      g
sigy
          1  1.590000  0.693000  0.210000  0.000  0.000  0.000
0.000
*EOS_JWL_TITLE
EOS-TNT
$#      eosid      a      b      r1      r2      omeg      e0
vo
          1  3.712000  3.2310E-2  4.150000  0.950000  0.300000  7.0000E-2
1.000000
*HOURLGLASS
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2      qb/vdc
qw
          1          1  1.0000E-6          0  1.500000  6.0000E-2  0.100000
0.100000
*PART
$# title
Part-Ar
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt
tmid
          2          1          2          2          1          0          0
0
*MAT_NULL_TITLE
Mat-Ar
$#      mid      ro      pc      mu      terod      cerod      ym
pr
          2  1.2930E-3      0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
0.000
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_TITLE
EOS-Ar
$#      eosid      c0      c1      c2      c3      c4      c5
c6
          2      0.000  0.000  0.000  0.000  0.400000  0.400000
0.000
$#      e0      v0
```

```

2.5600E-6 1.000000
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP
$#      sid      idtype      gpname
      1          1
      2          1
*BOUNDARY_SPC_SET_ID
$#      id
heading
      1x1
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry
dofrz
      1          0          1          0          0          0          0
0
$#      id
heading
      2x-1
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry
dofrz
      2          0          1          0          0          0          0
0
$#      id
heading
      3y1
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry
dofrz
      3          0          0          1          0          0          0
0
$#      id
heading
      4y-1
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry
dofrz
      4          0          0          1          0          0          0
0
$#      id
heading
      5z1
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry
dofrz
      5          0          0          0          1          0          0
0
$#      id
heading
      6z-1
$#      nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry
dofrz
      6          0          0          0          1          0          0
0
*CONTROL_ALE
$#      dct      nadv      meth      afac      bfac      cfac      dfac
efac
      -1          1          3 -1.000000      0.000      0.000      0.000
0.000
$#      start      end      aafac      vfact      prit      ebc      pref
nsidebc
      0.0001.0000E+20 1.000000 1.0000E-6          0          2 1.0000E-6
0
$#      ncpl      nbkt      imascl      checkr
      1          50          0          0.000
*CONTROL_ENERGY

```

```

$#      hgen      rwen      slnten      rylene
          2          2          2          1
*CONTROL_TERMINATION
$#  endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
    2500.0000          0      0.000      0.000      0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$#  dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm      erode
ms1st
    0.000      0.600000          0      0.000      0.000          0          0
0
$#  dt2msf      dt2mslc      imsc1      unused      unused      rmscl
    0.000          0          0          unused      unused      0.000
*DATABASE_GLSTAT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
    10.000000          0          0          1
*DATABASE_MATSUM
$#      dt      binary      lcur      ioopt
    10.000000          0          0          1
*DATABASE_TRHIST
$#      dt      binary      lcur      ioopt
    10.000000          0          0          1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid
    10.000000          0          0          0          0
$#      ioopt
    0
*DATABASE_TRACER
$#      time      track      x      y      z      ammg      nid
    0.000          1      6.000000      25.500000      0.000          0          0
*DEFINE_VECTOR_TITLE
vetor
$#      vid      xt      yt      zt      xh      yh      zh
cid
    300          0.000          0.000          0.000          0.000      1.000000          0.000
0
*INITIAL_ALE_MAPPING
$#      pid      typ      ammsid
    10          0          20
$#      xo      yo      zo      vecid
    25.000000          0.000      20.000000          300
*INCLUDE
D:\Utilizadores\Arikson\Os Meus Documentos\Map-3D.k
*END

```

## ANEXO-F

Comandos utilizados para modelar a explosão do alto-explosivo TNT dentro da caixa fechada utilizando a tecnologia do FSI e utilizando o método de advecção de Donor Cell (Para o método de advecção de Van Leer, METH = 2 em \*CONTROL-ALE), no modelo 3D.

```

$# LS-DYNA Keyword file created by LS-PrePost 4.1 (Beta) -
*KEYWORD MEMORY=8000000000
*TITLE
$# title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*PART
$# title
Part-TNT
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt
tmid
          1          1          1          1          1          0          0
0
*SECTION_SOLID_TITLE
ALE
$#      secid      elform      aet
          1          11          0
*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN_TITLE
Mat-TNT
$#      mid      ro      d      pcj      beta      k      g
sigy
          1  1.590000  0.693000  0.210000  0.000  0.000  0.000
0.000
*EOS_JWL_TITLE
EOS-TNT
$#      eosid      a      b      r1      r2      omeg      e0
vo
          1  3.712000  3.2310E-2  4.150000  0.950000  0.300000  7.0000E-2
1.000000
*HOURLGLASS
$#      hgid      ihq      qm      ibq      q1      q2      qb/vdc
qw
          1          1  1.0000E-6          0  1.500000  6.0000E-2  0.100000
0.100000
*PART
$# title
Part-Ar
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt
tmid
          2          1          2          2          1          0          0
0
*MAT_NULL_TITLE
Mat-Ar
$#      mid      ro      pc      mu      terod      cerod      ym
pr
          2  1.2930E-3      0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
0.000
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_TITLE
EOS-Ar
$#      eosid      c0      c1      c2      c3      c4      c5
c6
          2      0.000  0.000  0.000  0.000  0.400000  0.400000
0.000
$#      e0      v0

```

```

2.5600E-6 1.000000
*PART
$# title
Part-Structural
$#      pid      secid      mid      eosid      hgid      grav      adpopt
tmid
      3      2      3      0      1      0      0
0
*SECTION_SOLID_TITLE
Structure
$#      secid      elform      aet
      2      1      0
*MAT_RIGID_TITLE
Mat-Steel
$#      mid      ro      e      pr      n      couple      m
alias
      3 7.780000 2.060000 0.281000 0.000 0.000 0.000
$#      cmo      con1      con2
1.000000 7.000000 7.000000
$# lco or a1      a2      a3      v1      v2      v3
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP
$#      sid      idtype      gpname
      1      1
      2      1
*CONTROL_ALE
$#      dct      nadv      meth      afac      bfac      cfac      dfac
efac
      -1      1      3 -1.000000 0.000 0.000 0.000
0.000
$#      start      end      aafac      vfact      prit      ebc      pref
nsidebc
0.0001.0000E+20 1.000000 1.0000E-6 0 0 1.0000E-6
0
$#      ncpl      nbkt      imascl      checkr
      1      50      0      0.000
*CONTROL_ENERGY
$#      hgen      rwen      slnten      rylen
      2      2      2      1
*CONTROL_TERMINATION
$#      endtim      endcyc      dtmin      endeng      endmas
2500.0000 0 0.000 0.000 0.000
*CONTROL_TIMESTEP
$#      dtinit      tssfacc      isdo      tslimt      dt2ms      lctm      erode
ms1st
0.000 0.600000 0 0.000 0.000 0 0
0
$#      dt2msf      dt2mslc      imsc1      unused      unused      rmscl
0.000 0 0 0.000
*DATABASE_GLSTAT
$#      dt      binary      lcur      ioopt
10.000000 0 0 1
*DATABASE_MATSUM
$#      dt      binary      lcur      ioopt
10.000000 0 0 1
*DATABASE_TRHIST
$#      dt      binary      lcur      ioopt
10.000000 0 0 1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$#      dt      lcdt      beam      npltc      psetid

```

```

10.000000      0      0      0      0
$#   iopt
      0
*DATABASE_TRACER
$#   time      track      x      y      z      ammg      nid
      0.000      1 19.000000 10.500000-20.000000      0      0
*INITIAL_ALE_MAPPING
$#   pid      typ      ammsid
      10      0      20
$#   xo      yo      zo      vecid
      0.000-15.000000      0.000      300
*DEFINE_VECTOR_TITLE
vetor
$#   vid      xt      yt      zt      xh      yh      zh
cid
      300      0.000      0.000      0.000      0.000 1.000000      0.000
0
*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID_TITLE
$#   cupid
title
      1FSI
$#   slave      master      sstyp      mstyp      nquad      ctype      direc
mcoup
      3      10      1      0      0      4      1
-20
$#   start      end      pfac      fric      frcmin      norm      normtyp
damp
      0.0001.0000E+10 0.100000      0.000 0.500000      0      0
0.000
$#   cq      hmin      hmax      ileak      pleak      lcidpor      nvent
blockage
      0.000      0.000      0.000      0 0.100000      0      0
0
$#   iboxid      ipenchk      intforc      ialesof      lagmul      pfacmm      thkf
      0      0      0      0      0.000      0      0.000
*INCLUDE
D:\Utilizadores\Arikson\Os Meus Documentos\Teste-10\Malha-3D-FSI.k
*END

```

## ANEXO-G

Resultados das pressões registadas nos dezanove sensores dos compartimentos 1, 2, 3, 4 e 5 para o alto-explosivo TNT posicionado no centro dos compartimentos.

Sensor	Compartimento-1				Compartimento-2				Compartimento-3			
	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]
1	3,000E-06	439	3,747E-06	1410	3,003E-06	439			2,760E-06	459	2,883E-06	2480
2	3,663E-06	730			4,180E-06	629			4,317E-06	588		
3	5,381E-06	978			4,764E-06	1030			4,184E-06	1120		
4	3,663E-06	730			3,030E-06	889	3,224E-06	1400	2,600E-06	1040	3,452E-06	1330
5	3,050E-06	430	3,321E-06	1430	4,052E-06	299			5,240E-06	219		
6	3,701E-06	738			3,339E-06	800			2,890E-06	908	3,584E-06	1660
7	3,050E-06	430	3,321E-06	1430	2,276E-06	619			1,960E-06	809	2,285E-06	1180
8	2,509E-06	578			2,444E-06	590			2,255E-06	639		
9	2,683E-06	509			2,789E-06	479			2,661E-06	490		
10	2,683E-06	509			2,557E-06	548			2,315E-06	609		
11	3,456E-06	788			3,756E-06	730			3,944E-06	649		
12	3,456E-06	788			2,936E-06	928			3,157E-06	1160		
13	2,711E-06	509			3,368E-06	380			3,964E-06	308		
14	2,528E-06	578			2,759E-06	509			2,828E-06	490		
15	3,468E-06	788			3,142E-06	859			2,782E-06	959		
16	2,754E-06	509			3,052E-06	439			3,094E-06	418		
17	2,528E-06	578			2,100E-06	730			1,870E-06	899	2,292E-06	1390
18	2,754E-06	509			2,200E-06	670	2,260E-06	1550	1,940E-06	840	2,052E-06	998
19	2,711E-06	498			2,160E-06	688	2,572E-06	1270	1,900E-06	868	2,563E-06	1250



Sensor	Compartmento-4				Compartmento-5			
	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]
1	2,760E-06	459	3,253E-06	2450	2,750E-06	450	3,0542E-06	709
2	4,517E-06	540			4,623E-06	519		
3	4,102E-06	1210			3,354E-06	1360		
4	3,098E-06	1310			4,100E-06	1370		
5	6,610E-06	170			8,144E-06	130		
6	2,650E-06	1020	2,762E-06	1730	2,290E-06	1200	2,460E-06	1820
7	1,820E-06	989	2,468E-06	1180	2,430E-06	1240	3,403E-06	1830
8	2,190E-06	679	2,431E-06	788	2,683E-06	758		
9	2,700E-06	479	2,974E-06	2470	2,720E-06	468	3,009E-06	570
10	2,210E-06	660	2,577E-06	930	2,080E-06	718	2,805E-06	880
11	3,412E-06	718			3,196E-06	748		
12	3,712E-06	1210			3,604E-06	1360		
13	4,506E-06	259			4,894E-06	229		
14	2,722E-06	498			2,503E-06	549		
15	2,574E-06	1070			2,230E-06	1250	2,880E-06	1530
16	2,939E-06	439			2,685E-06	478		
17	2,220E-06	1090	2,483E-06	1410	2,130E-06	1240	2,328E-06	1540
18	2,260E-06	1050	2,749E-06	1730	2,160E-06	1200	2,523E-06	1820
19	1,790E-06	1040	2,415E-06	1210	2,397E-06	1270		
Máx	6,610E-06				8,144E-06			
	Valor máximo de pressão registado no evento				Pressão máxima registada no Sensor			
					2º Pico	3º Pico	4º pico	5º Pico
								7º Pico

## ANEXO-H

O procedimento geral para utilizar o manual da UFC-3-340-02 (2008).

1. From Fig. 2-51, select the particular surface of the structure which conforms to the protective structure given and note  $N$  of adjacent reflecting surfaces as indicated in parenthesis.
2. Determine the values of the parameters indicated for the selected surface of the structure in Item 1 above and calculate the following quantities:  $h/H$ ,  $l/L$ ,  $L/H$ ,  $L/R_A$ , and  $Z_A = R_A / W^{1/3}$ .
3. Refer to Table 2-3 for the proper peak reflected pressure and impulse charts conforming to the number of adjacent reflected surfaces and the values of  $l/L$  and  $h/H$  of Item 2 above, and enter the charts to determine the values of  $p_r$  and  $i_r / W^{1/3}$ .

Table 2-3

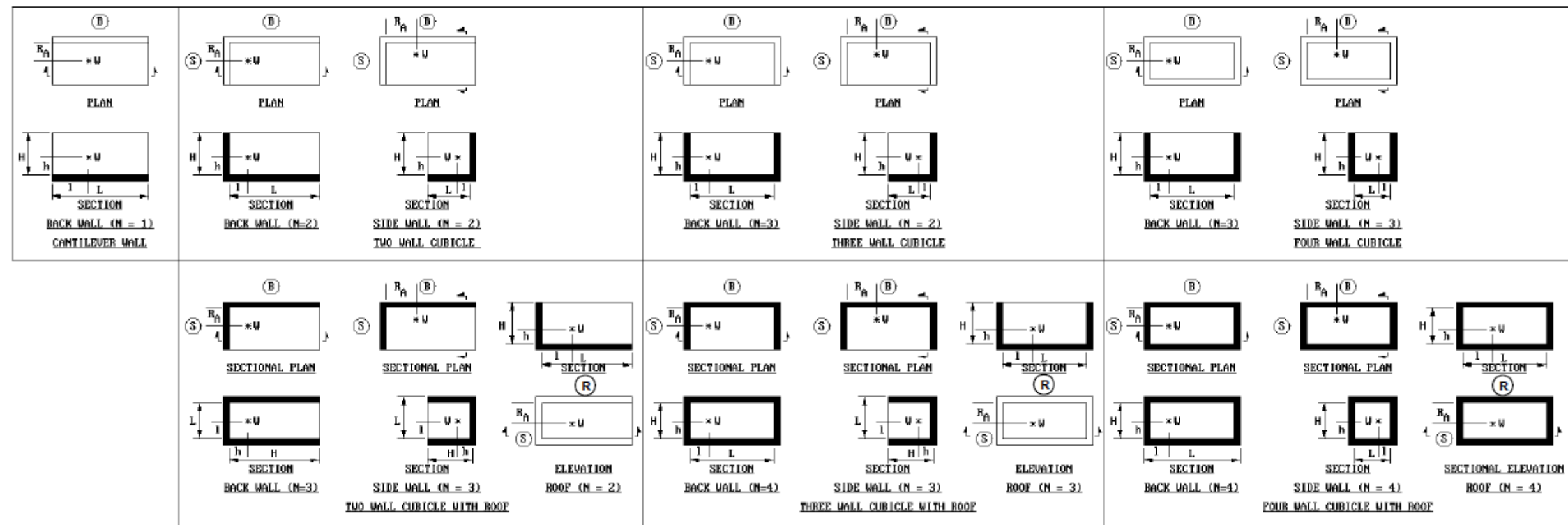
List of illustrations for average peak reflected pressure and scaled average unit reflected impulse.

$h/H$	$l/L$	Average peak reflected pressure				Scaled average unit reflected impulse			
		Number of adjacent reflecting surfaces							
		One	Two	Three	Four	One	Two	Three	Four
0.10	0.10	2-52	2-64	2-80	2-92	2-101	2-113	2-129	2-141
	0.25	2-53	2-65	2-81	2-93	2-102	2-114	2-130	2-142
	0.50	2-54	2-66	2-82	2-94	2-103	2-115	2-131	2-143
	0.75	2-55	2-67	2-81	2-93	2-102	2-116	2-130	2-142
0.25	0.10	2-55	2-68	2-83	2-95	2-104	2-117	2-132	2-144
	0.25	2-56	2-69	2-84	2-96	2-105	2-118	2-133	2-145
	0.50	2-57	2-70	2-85	2-97	2-106	2-119	2-134	2-146
	0.75	2-58	2-71	2-86	2-98	2-107	2-120	2-133	2-145
0.50	0.10	2-58	2-72	2-86	2-98	2-107	2-121	2-135	2-147
	0.25	2-59	2-73	2-87	2-99	2-108	2-122	2-136	2-148
	0.50	2-60	2-74	2-88	2-100	2-109	2-123	2-137	2-149
	0.75	2-59	2-75	2-87	2-99	2-108	2-124	2-136	2-148
0.75	0.10	2-61	2-76	2-89	2-95	2-110	2-125	2-138	2-144
	0.25	2-62	2-77	2-90	2-96	2-111	2-126	2-139	2-145
	0.50	2-63	2-78	2-91	2-97	2-112	2-127	2-140	2-146
	0.75	2-62	2-79	2-90	2-96	2-111	2-128	2-139	2-145

## Notes:

1. B denotes Back Wall, S denotes Side Wall and R denotes Roof.
2. Numbers in parenthesis indicate number, N, of reflecting surfaces adjacent to surface in question.
3. h is always measured to the nearest reflecting surface.
4. l is always measured to the nearest reflecting surface except for the cantilever wall where it is measured to the nearest free edge.
5. For values of average peak pressures for barrier and cubicle arrangements shown, see Figures 2-52 to 2-100.  
For respective scaled average impulses, see Figures 2-101 to 2-149.  
For reference list of above Figures for particular values of required parameters in Note 6, see Figure 2-3.
6. Required parameters: N,  $l/L$ ,  $h/H$ ,  $L/H$ ,  $L/R_B$ ,  $Z_R = R_B/W^{1/3}$

Figure 2-51 Barrier and Cubicle Configurations and Parameters





## ANEXO-I

Resultados das pressões registadas nos dezanove sensores dos compartimentos 1, 2, 3, 4 e 5 para o alto-explosivo TNT posicionado em diferentes posições dentro dos cinco compartimentos.

## Compartimento-1

[illegible]

Compartmento-2

Compartmento-2													
Sensor	Posição do explosivo (x/2,0,0)=(18,75,0,0)				Posição do explosivo (0,y/2,0)=(0,15,0)				Posição do explosivo (0,0,z/2)=(0,0,12)				
	P1 [MBar]	T1[μs]	P2 [MBar]	T2 [μs]	P1 [MBar]	T1[μs]	P2 [MBar]	T2 [μs]	P1 [MBar]	T1[μs]	P2 [MBar]	T2 [μs]	
1	2,581E-06	549			7,677E-06	140			2,792E-06	490			
2	3,764E-06	730			6,660E-06	380			4,948E-06	459			
3	6,908E-06	719			5,441E-06	818			4,791E-06	869			
4	4,826E-06	549			3,635E-06	669			3,000E-06	918			
5	3,059E-06	428			3,332E-06	389			1,231E-05	89.7			
6	6,033E-06	450			3,205E-06	858			3,678E-06	629			
7	4,836E-06	209			2,160E-06	688	2,388E-06	1260	2,200E-06	670	2,885E-06	1530	
8	2,800E-06	488			3,618E-06	339			2,570E-06	548	2,738E-06	649	
9	2,467E-06	588			5,748E-06	199			3,004E-06	439			
10	3,004E-06	440			3,983E-06	289			2,450E-06	600			
11	4,179E-06	630			5,057E-06	498			4,114E-06	560			
12	4,521E-06	588			3,449E-06	708			4,562E-06	889			
13	2,752E-06	509			4,052E-06	299			5,432E-06	189			
14	3,366E-06	379			3,052E-06	439			3,561E-06	329			
15	5,217E-06	509			3,412E-06	799			3,386E-06	688			
16	4,067E-06	300			2,728E-06	509			4,277E-06	250			
17	3,454E-06	349			2,200E-06	660	2,294E-06	978	2,655E-06	729			
18	4,146E-06	270			2,098E-06	730			2,697E-06	688			
19	3,833E-06	300			2,280E-06	619	2,672E-06	1250	2,096E-06	729			
Máx	6,908E-06				7,677E-06				1,231E-05				

Compartimento-2																
Sensor	Posição do explosivo (x/2,y/2,0)=(18,75,15,0)				Posição do explosivo (x/2,0,z/2)=(18,75,0,12)				Posição do explosivo (0,y/2,z/2)=(0,15,12)				Posição do explosivo (x/2,y/2,z/2)=(18,75,15,12)			
	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]
1	4,088E-06	279			2,454E-06	599			5,602E-06	199			3,646E-06	339		
2	5,071E-06	488			4,161E-06	549			1,294E-05	199			7,160E-06	329		
3	1,007E-05	509			8,509E-06	558			5,964E-06	660			1,436E-05	359		
4	8,418E-06	309			4,477E-06	589			3,445E-06	709			7,085E-06	359		
5	2,765E-06	509			4,329E-06	249			5,158E-06	199			3,593E-06	329		
6	5,171E-06	518			9,015E-06	279			3,409E-06	688			6,940E-06	350		
7	3,784E-06	300			4,064E-06	279			2,083E-06	739			3,378E-06	359		
8	5,717E-06	199			3,005E-06	440			3,983E-06	289			7,614E-06	139		
9	3,618E-06	330			2,590E-06	549	2,755E-06	639	7,677E-06	140			4,088E-06	279		
10	7,614E-06	139			2,792E-06	489			3,594E-06	340			5,600E-06	199		
11	6,645E-06	379			4,948E-06	459			7,173E-06	329			1,292E-05	199		
12	7,133E-06	360			4,960E-06	549	5,274E-06	629	5,252E-06	688			8,418E-06	309		
13	3,059E-06	428			3,633E-06	320			1,231E-05	89.7			4,329E-06	249		
14	4,067E-06	300			5,394E-06	190			4,277E-06	250			1,233E-05	90		
15	6,034E-06	450			6,969E-06	339			3,755E-06	629			9,015E-06	279		
16	3,326E-06	389			1,233E-05	90			3,546E-06	329			5,105E-06	199		
17	4,146E-06	270			3,833E-06	300			2,740E-06	699	3,003E-06	799	4,836E-06	209		
18	3,371E-06	349			4,836E-06	209			2,659E-06	728			3,784E-06	300		
19	4,836E-06	209			3,389E-06	349			2,200E-06	670	2,571E-06	858	4,064E-06	279		
Máx	1,007E-05				1,233E-05				1,294E-05				1,436E-05			
	Valor máximo de pressão registrado no evento				Pressão máxima registrada no Sensor											
													</			

Compartmento-3

Compartmento-3													
Sensor	Posição do explosivo (x/2,0,0)=(22,5,0,0)				Posição do explosivo (0,y/2,0)=(0,15,0)				Posição do explosivo (0,0,z/2)=(0,0,10)				
	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	
1	2,315E-06	609			6,064E-06	149			2,660E-06	490	3,629E-06	2350	
2	3,578E-06	719			8,449E-06	319			4,716E-06	449			
3	6,499E-06	730			4,669E-06	900			4,140E-06	979			
4	3,960E-06	619	4,217E-06	1040	2,910E-06	828	3,591E-06	1150	3,725E-06	1050			
5	3,094E-06	418			3,850E-06	319			1,555E-05	59,8			
6	5,844E-06	449			2,826E-06	959			2,914E-06	779			
7	3,930E-06	289			1,900E-06	869	2,960E-06	1210	2,270E-06	859	2,476E-06	1590	
8	2,661E-06	490			3,105E-06	380			3,258E-06	609			
9	2,255E-06	639			5,413E-06	189			3,588E-06	469			
10	2,762E-06	459			3,259E-06	339			2,258E-06	639			
11	4,213E-06	600			6,588E-06	389			4,152E-06	509			
12	3,828E-06	649			2,860E-06	849	3,343E-06	978	4,005E-06	988			
13	2,828E-06	490			5,240E-06	219			5,528E-06	160			
14	3,964E-06	308			3,094E-06	418			3,213E-06	349			
15	5,048E-06	509			3,470E-06	978			2,764E-06	819			
16	5,240E-06	219			2,804E-06	498			3,661E-06	280			
17	3,121E-06	400			1,950E-06	838	2,939E-06	978	2,604E-06	839			
18	3,601E-06	319			1,870E-06	900	2,038E-06	1040	2,738E-06	789			
19	3,286E-06	369			1,980E-06	808	2,988E-06	1170	2,272E-06	899			
Máx	6,499E-06				8,449E-06				1,555E-05				



Compartimento-3																	
Sensor	Posição do explosivo (x/2,y/2,z/0)=(22,5,15,0)				Posição do explosivo (x/2,0,z/2)=(22,5,0,10)				Posição do explosivo (0,y/2,z/2)=(0,15,10)				Posição do explosivo (x/2,y/2,z/2)=(22,5,15,10)				
	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	
1	3,259E-06	339			2,262E-06	639			5,264E-06	189			3,121E-06	379			
2	5,200E-06	479			3,627E-06	580			1,248E-05	189			5,932E-06	349			
3	9,819E-06	509			6,710E-06	599			4,650E-06	768			1,128E-05	390			
4	6,431E-06	369			3,909E-06	649			3,926E-06	849			5,835E-06	399			
5	2,804E-06	498			3,661E-06	280			5,482E-06	170			3,126E-06	359			
6	5,022E-06	519			7,441E-06	308			2,799E-06	820			5,841E-06	379			
7	3,267E-06	369			3,593E-06	329			2,275E-06	909			3,066E-06	410			
8	5,413E-06	189			3,588E-06	469			3,271E-06	340			6,064E-06	149			
9	3,105E-06	380			3,261E-06	609			6,064E-06	149			3,271E-06	340			
10	6,064E-06	149			2,662E-06	490			3,121E-06	379			5,264E-06	189			
11	7,895E-06	339			4,547E-06	469			8,459E-06	259			1,124E-05	209			
12	5,941E-06	400			6,495E-06	619			4,419E-06	780			6,690E-06	379	7,239E-06	439	
13	3,094E-06	418			3,213E-06	349			1,555E-05	59,8			3,661E-06	280			
14	5,240E-06	219			5,528E-06	160			3,661E-06	280			1,555E-05	59,8			
15	5,844E-06	449			5,869E-06	380			3,020E-06	768	3,281E-06	849	7,491E-06	310			
16	3,850E-06	319			1,555E-05	59,8			3,126E-06	359			5,482E-06	170			
17	3,600E-06	319	3,9852E-06	639	3,330E-06	369		439	2,830E-06	789	3,123E-06	868	3,931E-06	289			
18	3,073E-06	400			3,931E-06	289			2,610E-06	839			3,300E-06	370	3,444E-06	439	
19	3,930E-06	289			3,078E-06	400			2,955E-06	919			3,592E-06	329			
Máx	9,819E-06				1,555E-05				1,555E-05				1,555E-05				
	Valor máximo de pressão registrado no evento				Pressão máxima registrada no Sensor												
					2º Pico				3º Pico				6º Pico				

Compartimento-4

Compartimento-4													
Sensor	Posição do explosivo (x/2,0,0)=(26,25,0,0)				Posição do explosivo (0,y/2,0)=(0,15,0)				Posição do explosivo (0,0,z/2)=(0,0,8,5)				
	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	
1	2,200E-06	660	2,590E-06	928	6,064E-06	149			2,719E-06	479			
2	3,429E-06	729			9,653E-06	280			4,607E-06	430			
3	6,253E-06	750			4,160E-06	999			3,926E-06	1100			
4	3,830E-06	679	4,765E-06	949	2,720E-06	989	4,141E-06	1130	3,623E-06	1150			
5	2,942E-06	440			4,357E-06	269			1,624E-05	50			
6	5,688E-06	460			2,565E-06	1070			2,480E-06	910	2,802E-06	1720	
7	3,614E-06	349			1,780E-06	1050	2,724E-06	1230	2,320E-06	970	2,456E-06	1670	
8	2,704E-06	478			2,808E-06	430			3,095E-06	629			
9	2,180E-06	679	2,427E-06	790	5,609E-06	179			4,143E-06	449			
10	2,760E-06	460			2,900E-06	400			2,773E-06	678			
11	4,491E-06	538			4,894E-06	489			3,312E-06	609			
12	3,820E-06	709	4,484E-06	799	3,887E-06	1010			3,725E-06	1110			
13	2,719E-06	510			6,610E-06	170			5,813E-06	149			
14	4,505E-06	260			2,946E-06	439			2,817E-06	389			
15	5,029E-06	518			3,374E-06	1030			2,394E-06	959			
16	6,662E-06	169			2,725E-06	509			3,137E-06	319			
17	2,997E-06	450			3,211E-06	1060			2,317E-06	970			
18	3,426E-06	379			2,230E-06	1090	2,591E-06	1320	2,400E-06	920	2,630E-06	1640	
19	3,080E-06	428			1,900E-06	999	3,558E-06	1150	2,260E-06	1020	2,286E-06	1390	
Máx	6,662E-06				9,653E-06				1,624E-05				

Compartimento-4																
Sensor	Posição do explosivo (x/2,y/2,z/2)=(26,25,15,0)				Posição do explosivo (x/2,0,z/2)=(26,25,0,8,5)				Posição do explosivo (0,y/2,z/2)=(0,15,8,5)				Posição do explosivo (x/2,y/2,z/2)=(26,25,15,8,5)			
	P1 [MBar]	T1 [μs]	P2 [MBar]	T2 [μs]	P1 [MBar]	T1 [μs]	P2 [MBar]	T2 [μs]	P1 [MBar]	T1 [μs]	P2 [MBar]	T2 [μs]	P1 [MBar]	T1 [μs]	P2 [MBar]	T2 [μs]
1	2,856E-06	410			2,772E-06	680			5,500E-06	179			2,817E-06	430		
2	4,878E-06	490			3,302E-06	610			1,250E-05	170			4,917E-06	379		
3	9,972E-06	518			6,033E-06	630			4,000E-06	888			1,090E-05	398		
4	6,149E-06	419			5,444E-06	700			3,654E-06	949			6,028E-06	449		
5	2,730E-06	509			3,040E-06	320			5,324E-06	149			2,772E-06	398		
6	4,940E-06	529			6,286E-06	339			2,374E-06	959			5,153E-06	409		
7	3,055E-06	428			3,412E-06	379			2,250E-06	1020			2,947E-06	460		
8	5,599E-06	179			4,143E-06	450			4,132E-06	399			6,046E-06	150		
9	2,815E-06	428			3,106E-06	630			6,065E-06	149			4,039E-06	409		
10	6,046E-06	150			2,722E-06	480			2,830E-06	429			5,499E-06	179		
11	9,687E-06	279			4,591E-06	428			4,957E-06	379			1,237E-05	169		
12	5,891E-06	448			6,005E-06	649			3,853E-06	899			1,005E-05	420		
13	2,944E-06	439			2,797E-06	389			1,624E-05	50			3,041E-06	330		
14	6,662E-06	169			5,751E-06	150			3,134E-06	319			1,746E-05	49,5		
15	5,694E-06	459			5,132E-06	410			2,993E-06	949			6,271E-06	339		
16	4,339E-06	270			1,746E-05	49,5			2,791E-06	390			5,343E-06	150		
17	3,426E-06	379			4,539E-06	428			3,049E-06	949			4,774E-06	379		
18	2,938E-06	459			4,775E-06	379			2,318E-06	970			4,507E-06	430		
19	3,614E-06	349			2,970E-06	450			3,063E-06	1010			3,414E-06	379		
Máx	9,972E-06				1,746E-05				1,624E-05				1,746E-05			

Compartimento-5

Compartimento-5													
Sensor	Posição do explosivo (x/2,0,0)=(30,0,0)				Posição do explosivo (0,y/2,0)=(0,15,0)				Posição do explosivo (0,0,z/2)=(0,0,7,5)				
	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	
1	2,080E-06	730	2,7962E-06	888	6,064E-06	149			3,223E-06	490			
2	3,180E-06	758			1,056E-05	250			4,430E-06	418			
3	5,470E-06	778			3,343E-06	1150			3,158E-06	1270			
4	3,360E-06	739	5,3695E-06	899	4,154E-06	1180			2,892E-06	1300			
5	2,652E-06	489			4,894E-06	229			9,108E-06	59,8			
6	4,762E-06	519			2,260E-06	1240	2,625E-06	1440	2,120E-06	1120	3,472E-06	1760	
7	2,840E-06	450	3,2171E-06	718	2,597E-06	1320			1,980E-06	1150	2,121E-06	1830	
8	2,720E-06	478	3,0087E-06	579	2,540E-06	489	2,833E-06	589	2,821E-06	668			
9	2,679E-06	770			5,681E-06	170			4,139E-06	439			
10	2,760E-06	460	3,0542E-06	709	2,580E-06	479	3,000E-06	699	2,707E-06	719			
11	4,623E-06	519			4,304E-06	519			2,994E-06	659			
12	5,171E-06	789			3,324E-06	1160			2,950E-06	1270			
13	2,473E-06	558			8,144E-06	130			5,735E-06	140			
14	4,894E-06	229			2,694E-06	479			2,442E-06	449			
15	4,225E-06	579			3,176E-06	1190			2,077E-06	1160			
16	8,144E-06	130			2,505E-06	539			2,627E-06	389			
17	2,550E-06	539	2,9732E-06	630	3,169E-06	1200			1,970E-06	1160			
18	2,780E-06	468	3,0932E-06	589	2,140E-06	1240	2,682E-06	1360	2,010E-06	1120	2,374E-06	1750	
19	2,570E-06	519	3,0796E-06	758	3,814E-06	1210			1,930E-06	1190	2,397E-06	1480	
Máx	8,144E-06				1,056E-05				9,108E-06				

Compartimento-5																
Sensor	Posição do explosivo (x/2,y/2,z/2)=(30,15,0)				Posição do explosivo (x/2,0,z/2)=(30,0,7.5)				Posição do explosivo (0,y/2,z/2)=(0,15,7.5)				Posição do explosivo (x/2,y/2,z/2)=(30,15,7.5)			
	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]	P1 [MBar]	T1 [µs]	P2 [MBar]	T2 [µs]
1	2,540E-06	489	3,0077E-06	709	2,701E-06	720			5,580E-06	179			3,129E-06	500		
2	4,226E-06	530			2,974E-06	668			1,226E-05	160			3,951E-06	439		
3	8,140E-06	559			5,234E-06	678			3,089E-06	1080			7,594E-06	469		
4	4,660E-06	509	6,126E-06	740	4,895E-06	729			2,831E-06	1110			6,439E-06	519		
5	2,494E-06	550			2,574E-06	400			5,735E-06	140			2,413E-06	460		
6	4,336E-06	570			4,683E-06	418			2,080E-06	1160	2,123E-06	1820	4,085E-06	479		
7	2,580E-06	519	3,1184E-06	750	3,205E-06	479			1,940E-06	1190	2,148E-06	1420	3,226E-06	540		
8	5,681E-06	170			4,139E-06	439			3,578E-06	449			6,066E-06	149		
9	2,510E-06	499	2,8048E-06	599	2,806E-06	678			6,066E-06	149			3,506E-06	449		
10	6,064E-06	149			3,223E-06	490			3,123E-06	490			5,580E-06	179		
11	1,056E-05	250			4,430E-06	418			4,027E-06	430			1,226E-05	160		
12	4,590E-06	530	5,7369E-06	619	5,146E-06	700			2,903E-06	1080			7,419E-06	479		
13	2,658E-06	489			2,410E-06	459			9,108E-06	59,8			2,571E-06	400		
14	8,144E-06	130			5,735E-06	140			2,618E-06	390			9,107E-06	59,8		
15	4,832E-06	519			4,047E-06	479			2,872E-06	1110			4,712E-06	418		
16	4,894E-06	229			9,107E-06	59,8			2,443E-06	449			5,735E-06	140		
17	2,770E-06	469	3,1149E-06	589	3,758E-06	490			2,697E-06	1110			4,277E-06	430		
18	2,550E-06	539	2,9984E-06	629	4,274E-06	439			1,971E-06	1160			3,785E-06	490		
19	2,840E-06	449	4,6106E-06	699	3,211E-06	539			2,645E-06	1140			3,207E-06	479		
Máx	1,056E-05				9,107E-06				1,226E-05				1,226E-05			
	Valor máximo de pressão registrado no evento				Pressão máxima registrada no Sensor											

